

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Projeto e Desenvolvimento de um Veículo Submarino Autónomo

Carlos Filipe Silva Gonçalves

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Aníbal Castilho Coimbra de Matos

Co-orientador: Bruno Miguel Mateus Ferreira

27 de Julho de 2016

Resumo

Esta dissertação pretende descrever o projeto e desenvolvimento de um novo veículo submarino autónomo, em inglês *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). O conceito deste AUV é um veículo capaz de navegar em locais desafiantes. O seu tamanho, peso e manobrabilidade são os seus pontos fortes.

Do trabalho que tem vindo a ser desenvolvido na área da robótica submarina, surgiu a necessidade de conceber um AUV com características específicas para navegação em limitados volumes de água. Nomeadamente em rios, lagos, estruturas aquáticas e tanques de testes de reduzidas dimensões. Faz todo sentido, então, desenvolver um AUV de pequenas dimensões como o que se desenvolveu: o SHAD (*Small Hovering AUV with Differential actuation*), projetado para ter capacidade de estabilizar na coluna de água e ser facilmente reconfigurado e expansível.

O projeto e implementação do SHAD resultou da integração de diversos módulos e componentes já desenvolvidos pelo INESC TEC graças à sua experiência em projeto e desenvolvimento de robôs, de outras estruturas mecânicas e de eletrónica juntamente com software desenvolvidos ao longo do trabalho da dissertação.

O SHAD foi concebido tanto para operar em ambientes interiores como exteriores. Além da capacidade de navegar em pequenos espaços subaquáticos foi pensado para facilitar questões logísticas. A sua forma de torpedo juntamente com um diâmetro de 0,12 m, comprimento 0,90 m e peso 6,0 kg são vantajosos para poder ser transportado facilmente por um só operador e em um automóvel.

A sua geometria, peso e capacidades de atuação conferem ao SHAD uma grande manobrabilidade, característica importante na circunstância de pequenos volumes.

Ao longo deste documento serão apresentados detalhes sobre o projeto e construção do SHAD e serão mostrados resultados experimentais de testes a sensores e atuadores, bem como de testes à navegação do veículo.

Abstract

This dissertation presents the design and development of a new AUV, wich stands for Autonomous Underwater Vehicle. This AUV was conceptually designed to navigate in challenging volumes. The size, the weight and the maneuverability of this AUV were among the most important features.

From several applications in the domain of underwater robotics, emerged the need to design an AUV with specific characteristics enabling navigation in constrained volumes of water. Some examples include rivers, lakes, offshore structures or tests tank with small dimensions. To address those challenges, a new small-sized AUV has been developed: SHAD (Small Hovering AUV with Differential actuation). It was designed with hovering capabilities and can be easily reconfigured.

The design and implementation of the SHAD AUV resulted from the integration of several modules and components previously developed, based on the experience of INESC TEC in robots design and development, and from the development of other mechanical structures, electronics and software during the dissertation work.

The SHAD was designed so that it could operate both in indoor and outdoor environments. Further to the capability to navigate in constrained volumes of water, SHAD's design was thought with logistics concerns in mind. Its torpedo shaped body, with 0,12 m of diameter and 0,90 m of length, combined with 6,0 kg of weight are advantageous, as it is man portable, easily transportable and simplify logistics support.

The combined geometry, weight and actuation capabilities provide high maneuverability to SHAD, which is of special importance in small volumes.

This dissertation will detail the design and the development of SHAD and will present experimental results from sensors and actuators testing as well as vehicle navigation.

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus orientadores. Ao Bruno pela sua disponibilidade, paciência e vontade que eu realizasse um bom trabalho. Ao Prof. Aníbal pelo seu apoio e interesse demonstrados e por sempre terem acreditado no nosso sucesso.

À minha esposa Carolina, pelo incentivo e por nunca ter deixado que eu baixasse os braços. Agradeço também aos meus Pais pela motivação e apoio dados.

Carlos

*“Valeu a pena? Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena.
Quem quer passar além do Bojador
Tem que passar além da dor.
Deus ao mar o perigo e o abismo deu,
Mas nele é que espelhou o céu.”*

Fernando Pessoa

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Exposição do Trabalho e Motivação	1
1.2	Contextualização e Resumo do Desenvolvimento	1
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Introdução	3
2.2	Exemplos de AUV	3
2.3	Elementos Constituintes	4
2.3.1	Estrutura Mecânica	4
2.3.2	Sistemas de Energia	6
2.3.3	Sistemas Computacionais	6
2.3.4	Sistemas de Atuação	7
2.3.5	Sensores/ <i>Payload</i>	7
2.3.6	Comunicações Físicas	9
2.4	Aplicação	9
3	Requisitos e Conceito	11
3.1	Introdução	11
3.2	Requisitos	11
3.3	Conceito	12
3.4	Limitações	14
3.5	Conclusões	14
4	Especificação e Desenvolvimento	15
4.1	Estrutura Mecânica	16
4.1.1	Cilindro Central	16
4.1.2	<i>Endcaps</i>	17
4.1.3	Suportes Estruturais	18
4.1.4	Estrutura em Geral	20
4.1.5	Design do Nariz e da Cauda	20
4.2	Atuadores, Sensores e Eletrônica	22
4.2.1	Motores Propulsores	23
4.2.2	Módulos Propulsores Verticais	23
4.2.3	Propulsores Horizontais	24
4.2.4	Motor de Passo	25
4.2.5	Baterias	25
4.2.6	Sensores	25

4.2.7	Eletrónica	28
4.2.8	Desenvolvimento do módulo driver de motores	31
4.2.9	Desenvolvimento do circuito de interação com sensor de pressão	31
4.3	Camadas de Software	34
4.4	Conclusão	35
5	Testes e Resultados	37
5.1	Introdução	37
5.2	Testes	37
5.2.1	Teste de flutuação	37
5.2.2	Teste de estanquidade	37
5.2.3	Teste para determinação prática e validação do centro de massa	38
5.2.4	Teste de <i>thrusters</i>	38
5.2.5	Testes ao sensor de pressão e sensor inercial no sistema global	38
5.3	Resultados	39
5.3.1	Resultados do teste de estanquidade, flutuação e ao centro de massa	39
5.3.2	Resultados dos testes de força aos <i>thrusters</i>	40
5.3.3	Resultados do teste global	41
6	Conclusões e Trabalho Futuro	47
6.1	Satisfação dos Objetivos	47
6.2	Trabalho Futuro	48
A	Exemplos de AUV	49
	Referências	51

Lista de Figuras

2.1	Ataque de tubarão branco ao Remus 100	5
3.1	Arquitetura geral do sistema	12
3.2	Os seis graus de liberdade do modelo de um submarino [1]	13
4.1	Projeção superior do <i>autonomous underwater vehicle</i> (AUV)	15
4.2	Projeção frontal do AUV	16
4.3	Simulação de fresagem e modelo <i>computer aided design</i> (CAD) 2D dos topos da estrutura interna do cilindro central	17
4.4	Estrutura central com eletrónica e baterias	17
4.5	Tampas <i>endcaps</i>	18
4.6	Simulação em ferramenta computacional CAD/CAM de operação em torno	18
4.7	Suporte estrutural: realce da furação de fixação ao <i>endcap</i> e ranhuras de encaixe das <i>frames</i>	19
4.8	Exemplo de modelo 3D CAD de um suporte estrutural	19
4.9	Dimensões da forma do nariz e cauda	20
4.10	Dimensões das peças nariz e cauda	21
4.11	Peças impressas para o suporte da ficha de carregamento	21
4.12	Fichas aplicadas em cabo para carregamento de baterias	22
4.13	Disposição do sistema elétrico	22
4.14	<i>Thrusters</i> originais	23
4.15	Módulos propulsores verticais	24
4.16	Diferentes vistas das várias peças de um módulo propulsor vertical desmontado	24
4.17	Bateria de polímero de lítio (Li-po)	25
4.18	Sensor de pressão	25
4.19	Conector do sensor de pressão selado com epóxi	26
4.20	Sensor de orientação inercial	27
4.21	Echosounder para funções de desvio de obstáculos	28
4.22	Raspberry Pi 2 Model B usado como computador central	28
4.23	Placa de controlo de baterias e conversor CC-CC	29
4.24	Barramento de tensão junto ao computador central	29
4.25	Placa de interação com sensor de pressão	30
4.26	Exemplo de <i>driver</i> de um motor	30
4.27	Módulo <i>driver</i> de motores	31
4.28	Diagrama do <i>hardware driver</i> do sensor de pressão	32
4.29	Circuito de aquisição e condicionamento de sinal do sensor de pressão	32
4.30	<i>Layout</i> da placa de circuito impresso (PCB) fabricada para interação com sensor de pressão	34

4.31	Arquitetura do <i>software</i> utilizado	35
4.32	Batismo do SHAD	36
5.1	Teste e caracterização dos <i>thrusters</i>	39
5.2	<i>Script</i> de missão para teste do sensor de pressão	40
5.3	Diagrama de forças para as duas posições estáveis à superfície	41
5.4	Diagrama de forças para posição estável submerso	42
5.5	Força exercida por dois <i>thrusters</i>	43
5.6	Potência consumida por dois <i>thrusters</i>	43
5.7	Linearização da relação força-comando	44
5.8	Resultados da profundidade medida no teste ao sensor de pressão	44
5.9	Resultados do ângulo de <i>yaw</i> medido no teste ao sensor inercial	44
5.10	Resultados do ângulo de <i>pitch</i> medido no teste ao sensor inercial	45
5.11	Resultados de profundidade, <i>yaw</i> e <i>pitch</i> em teste composto	45

Lista de Tabelas

4.1	Características dos motores de propulsão	23
4.2	Características do sensor de pressão	26
4.3	Características do sensor de orientação	27
A.1	AUV e suas características	50

Abreviaturas e Símbolos

ADC conversor analógico-digital

AHRS *attitude and heading reference system*

AmpOp amplificador operacional

ASV *autonomous surface vehicle*

AUV *autonomous underwater vehicle*

CAD *computer aided design*

CAM *computer aided manufacturing*

CC corrente contínua

CNC *computerized numerical control*

DVL *Doppler velocity log*

EKF *extended Kalman filter*

ESC *electronic speed control*

GUI *graphical user interface*

GPS *global positioning system*

IMU *inertial measurement unit*

LBL *long baseline*

Li-ion íão lítio

Li-po polímero de lítio

MEMS *microelectromechanical systems*

NIB *navigation and instrumentation buoys*

OS sistema operativo

PC computador pessoal

PCB placa de circuito impresso

POM polioximetileno (poliacetal)

Rock *robot construction kit*

ROS *robot operating system*

ROV *remotely operated vehicle*

SHAD *Small Hovering Auv with Differential actuation*

UDP *user datagram protocol*

USBL *ultra-short baseline*

WLAN *wireless local area network*

Capítulo 1

Introdução

1.1 Exposição do Trabalho e Motivação

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da atividade de investigação feita no Ocean Systems Group do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Tecnologia e Ciência (INESC TEC). Este grupo dedica-se ao projeto, desenvolvimento e operação de sistemas robóticos e possui já um vasto e sólido trabalho realizado no âmbito da robótica submarina. Nomeadamente, detém soluções inteiramente desenvolvidas pelo grupo tais como veículos autónomos submarinos e veículos autónomos de superfície.

Derivado desta experiência e da necessidade de novos métodos e práticas de desenvolvimento, surge a vontade de construir um novo robô submarino. Este será diferente dos já concebidos no que diz respeito ao tamanho, ao peso e ao custo. Sendo então uma solução extremamente portátil e com uma grande manobrabilidade, adequada a pequenos espaços subaquáticos.

O desafio deste trabalho é então projetar, desenvolver e testar um veículo submarino autónomo desta natureza.

1.2 Contextualização e Resumo do Desenvolvimento

Os oceanos, lagos e outros meios subaquáticos são lugares dos quais o Homem precisa ter maior conhecimento. Por serem inóspitos, de difícil e perigoso acesso, há ainda hoje um profundo desconhecimento nesta área. Por outro lado sabe-se que são valiosos recursos que é preciso preservar. Há também diversas atividades científicas, comerciais e logísticas relacionadas com estes meios e tal como em outras áreas, a tendência da evolução é no sentido de se utilizar automação e robótica para auxiliar em tarefas dedicadas a estas áreas. Principalmente em tarefas perigosas, de elevado esforço ou até impossíveis do ponto de vista humano. É aqui que entram os veículos submarinos robóticos, dos quais existe já uma vasta gama de exemplos e uma forte expansão e desenvolvimento.

O trabalho realizado ao longo desta dissertação começa a enquadrar-se então na perspetiva descrita anteriormente, sendo que se pretendeu projetar e desenvolver um veículo submarino autónomo, conhecido em inglês como *autonomous underwater vehicle* (AUV). Não apenas mais um AUV, mas um que preenchesse certos requisitos ainda por preencher pelos demais, principalmente os já existentes no laboratório onde decorre o trabalho.

Os principais requisitos que este projeto pretende satisfazer são: disponibilizar um sistema de baixo custo, de reduzidas dimensões e baixo peso. A nível técnico seria de intervenção fácil no que diz respeito a aspetos como expansão, interação e manutenção. Seria vocacionado para testes e operações reais em reduzidos volumes de água, como um tanque de testes, estruturas subaquáticas confinadas a pequenos espaços e em pequenos rios ou lagos.

Para levar a bom porto o trabalho, decidiu-se então dividi-lo em etapas comuns ao desenvolvimento de sistemas. Essas subdivisões estão espelhadas na organização deste documento. De referir ainda que houve componentes do trabalho relacionadas com organização e gestão de projeto. Ao nível de comunicação entre os envolvidos, através de reuniões e trocas de emails para discussão de ideias, sugestões, trabalho feito e a se fazer. Ao nível da organização, através de plataformas colaborativas para partilhar dados e progressos, e diagrama de Gantt interativo para planear tarefas e visualização por todos do estado geral do desenvolvimento.

1.3 Estrutura da Dissertação

A organização do documento procura refletir a organização do trabalho realizado. Assim depois da introdução vem uma análise do estado da arte no mundo da robótica submarina, mais focado nos AUV, um levantamento de exemplos, tecnologias utilizadas e aplicações destes. Depois segue-se uma descrição do conceito do AUV que se pretende desenvolver e quais os requisitos a cumprir. Segue-se a especificação e desenvolvimento do projeto, com a discriminação detalhada dos componentes integrados e descrição das tarefas que decorreram do desenvolvimento de sub-sistemas.

Por fim são descritos os testes elaborados, mostrados os resultados dos mesmos e termina através de um capítulo com algumas conclusões retiradas do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

A tecnologia dos veículos submarinos autônomos (comumente conhecidos por *autonomous underwater vehicle*, em inglês, ou pelo respetivo acrónimo AUV), tal como a robótica em geral, encontra-se nos dias de hoje em estado de desenvolvimento com considerável avanço. Exemplo disso são os vários exemplos de veículos já desenvolvidos. Eles provêm das mais variadíssimas áreas, desde a científica à comercial, passando pela área militar. Estes sistemas beneficiam também do advento das novas tecnologias no campo dos materiais, técnicas de fabrico, sistemas computacionais, atuadores, sensores, redes de comunicação, sistemas de navegação, localização e todo o desenvolvimento geral no contexto dos últimos anos.

Fazendo uma análise do *estado da arte* no campo da robótica submarina, predominantemente voltada para os AUV, encontram-se diversos modelos construídos, normalmente associados às entidades que lhe deram origem, com diferentes características estruturais, aplicações e tecnologias empregues. É sobre estes assuntos que o presente capítulo se irá debruçar, procurando abranger os vários temas relacionados com o desenvolvimento de robôs submarinos, nomeadamente AUV.

Ao longo desta abordagem serão mencionados e descritos os elementos fundamentais que constituem um AUV. Quando um veículo utiliza especificamente uma dada tecnologia em discussão, será dado esse AUV como exemplo concreto. Em anexo está presente uma relação de AUV (ver A.1), elaborada com a comparação das principais características dos mesmos. Através da descrição e comparação dessas características predominantes, pretende-se tomar conhecimento do estado da arte no que respeita ao projeto e desenvolvimento de um AUV, o título desta dissertação.

2.2 Exemplos de AUV

Um AUV é um robô submarino concebido para executar missões sem o comando humano, não possuindo então uma ligação com o seu operador [2]. É controlado sim, por um computador pré-programado e tem incorporados os instrumentos e a energia necessária para no final se conduzir a si mesmo. Numa grande parte dos AUV, o movimento longitudinal é essencial para permitir o

mergulho. Outros, do tipo *hovering*, submergem na vertical e conseguem pairar na água. Existem ainda os *gliders* que modificam a sua flutuação para se mover para baixo e para cima. Enquanto os dois primeiros utilizam motores propulsores, os gliders não, o que lhes permite uma maior e grande autonomia devido à grande fatia da energia despendida pelos anteriores veículos na atuação de motores.

Possuem ainda variadíssimos dispositivos, como sensores, câmaras de vídeo, dispositivos de recolha de amostras e acústicos para realizarem um grande leque de tarefas do tipo mapeamento/batimetria, inspeção, académicas, análises e I&D em geral. Ao longo deste e dos próximos capítulos serão apresentados os elementos desta solução com substancial detalhe.

Na Tabela A.1 do Anexo A é feito um levantamento de AUV segundo o critério de pertencerem aos catalogados com chavões tais como *man-portable*, compactos, grande manobrabilidade, modulares, *hovering* e preferência pelos *open*.

Outros mais diversos AUV surgiram ao longo da pesquisa, alguns exemplos aos quais não foi dada tanta relevância são: Hugin, Munin, Trimares, Girona 500, Virginia Tech 690, MONSUN II, Folaga, Gavia, Remus 600 e Mola Mola.

Existem ainda alguns modelos que são híbridos, AUV e *remotely operated vehicle* (ROV), como por exemplo o P-SURO II [3].

2.3 Elementos Constituintes

2.3.1 Estrutura Mecânica

A estrutura mecânica dos AUV pode ser dividida em parte externa e parte interna. Na parte interna são colocados os componentes secos, ou seja, que não podem estar em contacto com água. À parte externa, em contacto com a água, são fixados componentes como propulsores e sensores e outros dispositivos que necessariamente precisam estar na parte molhada. Pode esta estrutura dar o acabamento final da forma ou ser montada ainda por cima algum tipo de carnação ou invólucro que confere ao veículo a sua forma hidrodinâmica. As formas mais comuns são cilíndricas e elipsoidais, lembrando a forma comum dos torpedos, mas há outras formas menos alongadas, mais espalmadas e num formato a tender para um paralelepípedo. Sempre, claro, com preocupações ao nível da hidrodinâmica, para maximizar eficiência e minimizar atritos. A parte interior costuma, de alguma forma, ser um compartimento estanque, por exemplo um *pressure hull* cilíndrico em alumínio, onde no seu interior a estrutura desenvolve-se em torno da alocação de componentes elétricos e de energia.

Em termos de materiais, são muito utilizados o alumínio, plásticos especiais e até compósito flutuante de titânio, no caso do FlatFish [4], para criar robustez mecânica sem que a estrutura seja demasiado pesada. São usados plásticos técnicos para construir peças complementares e plásticos correntes (PVC, acrílicos) ou fibras (de vidro) para peças de acabamento, como por exemplo a já referida cobertura ou revestimento exterior.

Em determinadas alturas é necessário modificar a flutuação do veículo. Para aumentar a força de impulsão, são adicionadas peças flutuantes, fabricadas em espumas sólidas, de baixa densidade e impermeáveis, que são facilmente maquinadas com a forma pretendida. Para diminuir a flutuação, são acrescentadas peças constituídas por materiais densos, que tornam o veículo mais pesado, sem alterar significativamente o seu volume.

Existe sempre, também, uma parte da estrutura responsável por fazer a mediação entre a parte exterior, molhada, e a interior impermeável. Para este fim podem ser usados conectores subaquáticos ou passagens impermeáveis, por exemplo, buçins.

Maioritariamente, quando se projeta e desenvolve um robô submarino em geral, as preocupações mecânicas são [5]:

1. Reduzir o volume em geral
2. Reduzir e distribuir o peso
3. Suportar determinadas profundidades sujeitas à pressão
4. Evitar danos por rotura de permeabilidade
5. Restrições de fabrico
6. Agilização de montagem, logística operacional e manutenção.

Devido a várias vezes haver necessidade de se reconfigurar o veículo, conforme as condições e o tipo da aplicação, há também a intenção de que sejam modulares ou de alguma forma extensíveis, para facilmente serem adaptados e reutilizados.

Em determinadas missões, além da pressão exercida pela água, impactos acidentais ou naturalmente com vegetação e outros corpos estranhos, a estrutura mecânica tem que enfrentar mais condições extremas, tal como é evidente na Figura 2.1 que a do AUV Remus 100 suportou [6].



Figura 2.1: Ataque de tubarão branco ao Remus 100

2.3.2 Sistemas de Energia

Tal como outros veículos, os AUV necessitam de energia para funcionar. Em todos os casos estudados essa energia provem de baterias ião lítio (Li-ion). O seu generalizado uso em sistemas, custo, durabilidade e densidade de energia (capacidade/kg) fazem delas a fonte de energia elétrica eleita. Têm cada vez mais autonomia e são facilmente substituídas. Existem, no entanto, sugestões de utilização de *fuel cells* [2].

Para carregar as baterias normalmente os AUV têm que vir à superfície e através de um cabo recebem a energia necessária ao seu carregamento. Existe também o conceito e projetos em desenvolvimento a fim de se possibilitar o fornecimento de energia em estações subaquáticas (*docking station*) através de ligação sem fios. Há ainda veículos com painéis solares que sobem à tona de água e carregam as suas baterias através de energia solar [7].

Associado ao carregamento de baterias vêm normalmente circuitos de controlo e segurança responsáveis por garantir a perseverança e o bom funcionamento das mesmas.

As baterias têm um peso considerável face aos restantes componentes alocados no compartimento impermeável. Por vezes, este fator é aproveitado para afastar o centro de massa do AUV do centro geométrico, colocando as baterias na parte mais inferior do compartimento.

2.3.3 Sistemas Computacionais

Com o advento das novas tecnologias em sistemas de computação, surgem computadores cada vez mais potentes, eficientes e compactos, alguns designados sistemas embebidos. A sua integração nos AUV, que anteriormente não era possível simplesmente por restrições de volume, é agora permitida devido ao seu diminuto peso, volume e baixo consumo de energia. Um formato *standard* utilizado hoje em dia em AUV é o PC104. É utilizado no Mares e nos seguintes veículos são usadas as respetivas configurações:

- O Sparus II usa um computador PC1e/104, Intel Core i7 2.20GHz Dual Core, 4M Smart Cache, 4GB DDR3 DRAM, 250GB SSD, 8 USB, 10 RS232;
- O Nessie VI usa dois PCs MSM2000 PC104, Intel Atom Processor, 1.66GHz, 1GB RAM, 4 USB 2.0 port, 4 serial ports;

Em termos de arquitetura do sistema computacional são utilizados frequentemente (por exemplo no FlatFish [4] e no Nessie VI [8]) dois computadores, em que um é dedicado ao controlo de baixo nível, navegação e gestão de missão. O segundo é responsável pelo sistema de *payload*, câmaras de vídeo por exemplo.

Em cada computador pessoal (PC) posteriormente é instalado software sistema operativo (OS) generalizado, como distribuições de Linux, software dedicado à robótica, como *robot operating system* (ROS) e *robot construction kit* (Rock) e são elaborados programas em linguagens como C++ para criar, por exemplo, *devices drivers*. Alguns AUV comerciais vêm com uma *graphical user interface* (GUI) com o intuito de simplificar tarefas de manutenção, planeamento de missão,

verificação e análise de dados. É o caso do Remus 100. Por outro lado torna o sistema mais fechado e proprietário.

2.3.4 Sistemas de Atuação

Para que os AUV se possam mover no meio aquático, necessitam de dispositivos que lhe confira força de propulsão. Conforme as direções possíveis de força de propulsão, o robô é dotado de mais ou menos graus de liberdade. Segundo [9], nos modelos para veículos marinhos são estudados seis graus de liberdade, sendo necessárias seis coordenadas independentes para determinar a posição e orientação destes. São elas, três de translação (*surge, sway, heave*) e três de rotação (*roll, pitch, yaw*).

Os propulsores mais utilizados são os *thrusters*, compostos normalmente por um motor corrente contínua (CC) sem escovas, uma hélice com duas ou mais pás e um ducto em volta desta que a protege e protege dela, ao mesmo tempo que direciona o fluxo de água para maximizar a força exercida na direção de interesse. No caso do Sparus II, para controlar *pitch* são usadas barbatanas direcionáveis através de servomotores [10]. Também são usadas barbatanas sem atuação para estabilizar e definir o movimento do veículo. Em seguida apresentam-se alguns exemplos de *thrusters*:

- SeaBotix™HPDC1502 brushless thrusters, 280 W, controlados por H-Bridges, com compensação de pressão e possibilidade de descer a mais de 1000 m de profundidade;
- SeaBotix™BTD150 brushed thrusters, 100 W, 20 N forward thrust and up to 20 N reverse thrust and rated to 150 m depth;
- Enitech ring thrusters, 60 N

De referir também que estes *thrusters* são mais eficientes num sentido e permitem aos AUV atingirem velocidades na ordem dos 0 a 2 m/s para o Mares e Sparus II, 0 a 2,6 m/s para o Remus 100. Estes valores são fortemente condicionados pela configuração e *payload* do veículo.

2.3.5 Sensores/Payload

São os sensores e os dispositivos adicionais, *payload* (que podem também ser sensores), possíveis de integrar nos AUV, que os tornam extremamente úteis. Para além de auxiliarem na navegação e localização permitem que estes levem a cabo variadíssimas tarefas subaquáticas, como se descreve em 2.4. O *payload* pode ser configurado conforme a exigência de determinada missão.

Os sensores mais usados são sensor de pressão, comum a todos os AUV, que permitem medir a profundidade a que estes se encontram, sensores de navegação inerciais, que podem ser do tipo *inertial measurement unit* (IMU) ou mais elaborados como os *attitude and heading reference system* (AHRS). São também utilizados *Doppler velocity log* (DVL) juntamente com os inerciais. No caso do FlatFish é empregado como inercial um KVH 1750 IMU e como DVL um Rowe SeaProfiler DualFrequency 300/1200 kHz. Dentro da tecnologia acústica são utilizados também sistemas

de *long baseline* (LBL) e *ultra-short baseline* (USBL), como por exemplo modems acústicos. Podem ainda incluir sensores para controlo de temperatura interna do AUV e deteção de água no seu interior.

A maioria dos veículos permite diversas configurações de instrumentos com que vão apetrechados para uma missão e estes normalmente precisam de ligação de energia e comunicação com o sistema central. Existem as mais diversas configurações e que podem incluir dispositivos luminosos (tecnologia LED, por exemplo), sensores de temperatura e outros indicadores para análises ambientais, coletores de amostras de água, câmaras, sonares. O FlatFish é uma referência recheada deste tipo de tecnologia, nomeadamente possui: dois sistemas de câmaras estéreo, um sonar *profiling multi-beam* para inspeção (tem também um *multi-beam imager* para navegação) e dois Tritech Micron Sonar para desvios de obstáculos. Contam ainda com dois projetores de linha laser para criar modelos 3D de alvos a inspecionar [4].

Uma versão do Remus 100 contou com seis câmaras para uma missão de tracking de tubarões. Em um trabalho desenvolvido com o Girona 500 foi instalado neste AUV um manipulador elétrico com quatro graus de liberdade, sistema de vídeo e respetiva eletrónica de controlo [11].

2.3.5.1 Sistemas de Localização e Navegação

O sucesso da execução de determinadas operações por parte dos AUV é dependente da capacidade de estes navegarem e se localizarem dentro de certos limites impostos pelos sistemas que usam para tal. Quando submersos, estes sistemas comunicam com o exterior por meio de sinais acústicos. Os algoritmos utilizados são geralmente genéricos, havendo investigação e desenvolvimento a serem feitos na tentativa de vencer limitações da natureza da comunicação, predominantemente de baixa largura de banda. Exemplos de métodos de posicionamento acústico são LBL e USBL.

Internamente adquirem informação acerca do seu posicionamento através de sensores de pressão e inerciais, por exemplo. Estes últimos têm o problema de acumular erros, mas servem para métodos de *dead reckoning*, que consiste em estimar a posição atual através de informação acerca da posição anterior, velocidade, direção e tempo decorrido. Os resultados deste método podem ser fundidos com informação acústica do LBL através de um filtro de *Kalman* [5] para se obterem valores de navegação mais precisos. A informação obtida por *dead reckoning*, além da informação da navegação inercial, pode ainda resultar da fusão com medidas obtidas com DVL, usando também filtro *extended Kalman filter* (EKF) [4].

Quando o veículo vem à tona de água pode atualizar a sua posição via GPS. O Mares é assistido por umas plataformas flutuantes com boias, eletrónica, energia própria, recetor GPS e um *low power radio modem*. São chamadas de *navigation and instrumentation buoys* (NIB) e permitem apoiar o AUV na navegação ou podem executar outras tarefas de recolha de informação ambiental [5]. No apoio à navegação funcionam como *beacons* de navegação acústica. Sabe-se a sua posição e formam um sistema de posicionamento acústico, LBL, podendo o veículo determinar a sua posição por triangulação. Posteriormente podem transmitir os dados para outra plataforma de

controle de missão e assim fazer um seguimento da trajetória do veículo e aplicar algoritmos de refinamento de dados para obtenção de maior precisão na posição.

2.3.6 Comunicações Físicas

As tecnologias usadas em comunicações robóticas submarinas com o exterior podem-se dividir em dois grandes grupos: comunicações com fio e sem fio. As com fio (também chamado de cabo umbilical) são por norma as mais rápidas, usadas apenas para testes, descarga de dados e manutenção. O AUV FlatFish, por exemplo, tem dois tipos de comunicação por fio: fibra ótica de 10 Gb/s e Cat5e a 1 Gb/s (máximo de 50 m). As comunicações sem fio dividem-se em duas categorias: comunicações à superfície e comunicações submergidas. À superfície utilizam frequência de rádio para comunicar por satélite ou por redes locais através de *wireless access points*. Os AUV costumam ter uma antena para se afastar da linha de água e evitar ondulações que perturbem estas comunicações, já que são fortemente influenciadas por estes fatores. Novamente no caso do FlatFish são usados um modem satélite (1,6 GHz) Rock7mobile RockBlock Iridium, um módulo de rádio Digi XBee-Pro-868 (868 MHz) e um módulo de *wireless local area network* (WLAN) ubiquiti PicoStation M2 HP (2,4 GHz). Usa também um *beacon* LED de alta potência. Debaixo de água, por imposição do meio aquático, as comunicações entre veículos ou com estações à superfície (boias por exemplo) são de natureza acústica através de *transceivers* que são emissores/recetores de sinais num só dispositivo e *transponders* que identificam certos sinais exteriores e respondem com um respetivo sinal identificador. Os transceivers normalmente são acoplados a boias ou barcos, mantendo-os submersos, e os transponders são instalados nos AUV. O Remus 100, por exemplo, possui dois transponders para operação normal à gama de frequências 20 a 30 kHz e um de emergência. O FlatFish equipa Evologics S2CR 48/78 kHz com possibilidade de ser usado como USBL transponder.

Para comunicações internas usa-se Gigabit Ethernet para comunicação entre PC. Entre equipamentos e equipamentos-PC usam-se as comuns RS 232, USB I^2C , 1-wire (para comunicação com sensores de baixo nível) e conversões entre eles.

2.4 Aplicação

Os AUV são aplicados em diversas áreas (engenharia, biologia, comercial) para executarem tarefas de mapeamento, batimetria, inspeção de estruturas, I&D e análises. O FlatFish é utilizado para inspeção de infraestruturas subaquáticas de gás e petróleo mediante pedido, adquirindo modelos 3D de alta definição. O Remus 100, sendo um AUV comercial, tem uma vasta gama de aplicações nesta área e também na pesquisa marinha e defesa. Entre elas sublinha-se a exploração petrolífera, aquacultura, operações de pesca, qualidade da água, debaixo de gelo, estudo e avaliação de ecossistemas, arqueologia marinha, amostragem e mapeamento científico, alterações climáticas, hidrografia, respostas de emergência, operações de desativação de minas, operações de segurança, vigilância e reconhecimento.

Uma outra aplicação do Remus 100 foi para produzir um vídeo para um programa de TV, Remus SharkCam, que permitiu aos cientistas estudar de perto, pela primeira vez, os comportamentos predadores de tubarões no seu habitat natural. Permitiu também revelar detalhes sobre estratégias dos tubarões quando caçam e a forma como interagem com as suas presas [6]. Alguns tubarões mostraram comportamentos de defesa territorial para com o AUV.

O Mares foi concebido para monitorização de poluição, recolha de dados científicos, mapeamento através de sonar, obtenção de vídeos subaquáticos e operações de desativação de minas. Foi projetado também para recolha de amostras de água junto à costa, daí a sua profundidade máxima de atuação a 100 m [5].

Na generalidade todos os AUV podem executar missões nestas áreas, dado a sua versatilidade. O Sparus II, por exemplo, é designado como uma “*multipurpose platform that can adapt to industrial, scientific and academic applications*”.

Capítulo 3

Requisitos e Conceito

3.1 Introdução

O acesso aos meios subaquáticos envolve por vezes operações complicadas e perigosas do ponto de vista humano. Torna-se extremamente importante desenvolver robôs que executem tais tarefas de forma autónoma, preferencialmente. Assim, evitam-se as limitações que advêm das ligações físicas aos robôs para controlo remoto (tipo [ROV](#)) e da impossibilidade das comunicações subaquáticas serem como as comuns, usadas no ar. Redes sem fios e *global positioning system* ([GPS](#)) só funcionam debaixo de água em muito curtas distâncias e diretamente relacionadas com a potência de emissão e frequência, devido à grande atenuação destes sinais de rádio de alta frequência em meios subaquáticos. Apenas são possíveis comunicações com baixa largura de banda, tais como as comunicações acústicas frequentemente utilizadas. Partindo, então, de uma série de requisitos estabelecidos, fundamenta-se a criação de um conceito de [AUV](#) que servirá de base para o seu futuro desenvolvimento.

3.2 Requisitos

O que se pretende com este [AUV](#) é um robô subaquático de pequenas dimensões e pronto a operar em locais confinados a reduzido volume, como por exemplo, mergulhar num tanque de testes a um máximo de 10 m de profundidade. Poderá executar depois manobras nesse tanque de testes ou vir a operar em pequenos rios, lagos e outros espaços estruturados. Para isso será munido de um sistema de atuação capaz de lhe conferir uma manobrabilidade adequada a esses espaços. Será um [AUV](#) leve, que juntamente com a sua forma geométrica o tornam eficiente quando se move. O facto de ser de dimensões reduzidas e leve, permite também que seja facilmente transportável até de forma manual. Devido ao seu peso e à sua forma será também eficiente. Deverá ser modular, por forma a se obter um sistema que pode evoluir por partes. Desde serem acrescentados novos módulos à substituição de outros por novas versões. O que o torna também reconfigurável. Quando comparado com um vasto leque de robôs do mesmo género e atendo a que este tipo de tecnologia é por norma dispendiosa, terá que ser de baixo custo.

3.3 Conceito

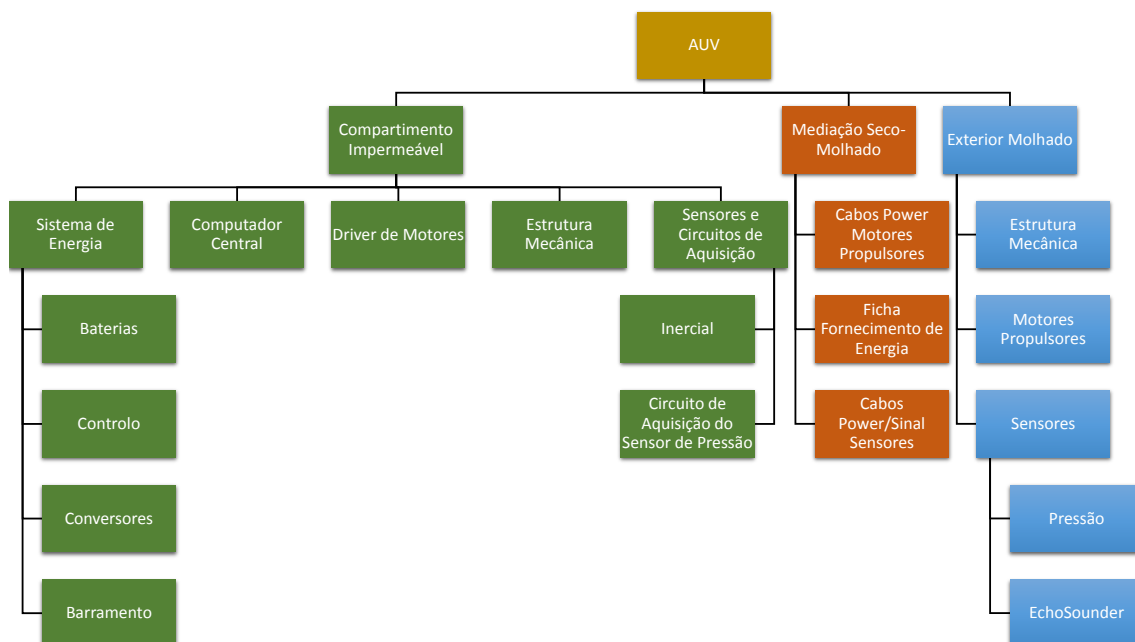


Figura 3.1: Arquitetura geral do sistema

Em termos de conceito, este robô submarino terá uma forma geométrica cilíndrica tipo torpedo, com um comprimento na gama próxima de 1 m e diâmetro próximo de 0,10 m. A forma cilíndrica tem sido comum em muitos [AUV](#), oferece uma boa capacidade de resistir à pressão e é uma forma geométrica facilmente extensível.

O veículo terá a particular capacidade de afundar verticalmente na coluna de água e imobilizar-se a profundidade constante.

A zona central da estrutura mecânica é constituída por um compartimento cilíndrico, oco e estanque onde é alocado espaço para baterias e eletrónica em geral. Será de fácil acesso e apenas para intervenção técnica. A estanquidade é garantida por duas tampas vedantes acopladas às extremidades do cilindro central. Essas tampas também são responsáveis pela conexão física, igualmente de forma estanque, entre o interior do cilindro e o exterior por onde se pode fazer passagem de cabos. A restante estrutura expande-se a partir deste núcleo através de variadas peças mecânicas que determinam a solidez de toda a estrutura. Esta, não sendo completamente modular, já que este é um requisito com alguma complexidade, terá que ser extensível e reconfigurável. Ou seja, o conceito, no que se refere ao desenvolvimento, envolve uma estrutura que se alonga por partes. Permite acrescentar outras peças constituintes do [AUV](#) ou *payload*, mas numa certa ordem de dependência. Se fosse modular haveria, por exemplo, um *standard* de encaixe comum a todos os módulos, que permitiria qualquer sequência de ligação entre eles. Todavia não é este o caso. No [AUV](#) que se propõe, é possível acrescentar novos “módulos”, que até podem ser desenvolvidos isoladamente, mas a sua integração terá uma certa dependência dos que já estão interligados.

O AUV terá quatro graus de liberdade (dos possíveis seis, Figura 3.2) o que implica, em termos de propulsão, uma configuração de quatro motores específicos para a aplicação subaquática. Dois deles serão para propulsão “horizontal” e outros dois para propulsão “vertical”. Os dois horizontais controlam *surge* e *yaw*, os dois verticais controlam *heave* e *pitch*, e lhe conferem a capacidade de *hovering*.

Outra particularidade é, em ambos os casos, os pares de atuadores funcionarem por atuação diferencial. Quando as hélices dos motores de um par induzem forças diferentes, geram-se binários em torno do centro de massa do veículo. Estes são aproveitados para controlar certos movimentos do AUV.

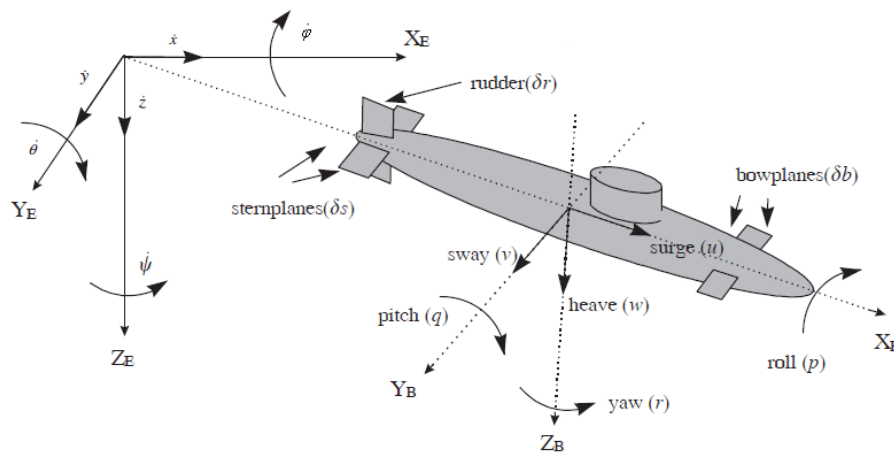


Figura 3.2: Os seis graus de liberdade do modelo de um submarino [1]

As extremidades, nariz e cauda, terão uma determinada forma que minimiza o atrito viscoso, tal como se pretende desde logo com a restante forma cilíndrica.

O AUV para ser funcional precisa obter informações da sua posição no meio aquático através de sensores. Estas informações devem-lhe permitir navegar e são obtidas através de sensores ou outros dispositivos. A profundidade a que se encontra o AUV será dada por um sensor de pressão, o desvio de obstáculos é feito recorrendo aos sinais acústicos emitidos e recebidos por um *echosounder*, a sua orientação será obtida através de sensores inerciais e a sua posição será dada por estimação através da fusão da informação inercial, com a atuação e com um modelo do veículo. À superfície será possível detetar e corrigir a sua posição através de GPS. Haverá comunicações série com ligação por fio entre os vários subsistemas dentro do cilindro central e *wireless* para comunicação com o exterior à tona da água. A energia necessária ao funcionamento do sistema será disponibilizada por baterias e o AUV incorporará uma ficha impermeável de fácil acesso para carregamento das mesmas.

O formato e componentes exteriores, assim como os componentes existentes dentro do núcleo central estanque, terão de ser dispostos de forma simétrica. Com este requisito espera-se que um outro seja cumprido, que é o centro de massa ficar próximo do centro de flutuação.

O novo AUV deve possibilitar também a importação de desenvolvimentos associados a outros veículos do laboratório, facilitando a portabilidade de software ao nível da navegação e controlo, por exemplo.

Na Figura 3.1 está representado o conceito da arquitetura geral do sistema. Engloba três grandes partes: o compartimento impermeável, o exterior em contacto com a água e a mediação dos dois. Os constituintes de cada ramo são os comuns ao desenvolvimento de robôs e alguns dedicados a robôs submarinos, por exemplo, o sensor de pressão.

3.4 Limitações

Os modelos pesquisados têm dimensões e características que os impossibilitam de operar em ambientes interiores (estruturas, tanques de teste) e exteriores (estruturados, naturais) confinados por reduzidos volumes. O seu peso é também considerável para serem facilmente transportados por um operador e estão vocacionados para manobras e missões em grandes volumes de água. Nem todos os AUV pesquisados e citados são comerciais, no entanto sabe-se que qualquer Remus custa várias dezenas de milhares de euros. São, então, caros para serem adquiridos ou construídos mediante modestos orçamentos e de certa forma condicionados a arquiteturas e subsistemas proprietários, o que por vezes dificulta a incorporação de novos *devices* [5]. A informação sobre o custo de um AUV foi obtida de forma qualitativa (muito caros!) por sondagem e interrogação a profissionais com experiência neste mercado. A sua construção tem de igual forma um custo elevado e nem sempre se reúnem as condições necessárias ou suficientes para o fazer.

3.5 Conclusões

Existe uma considerável oferta de AUV. No entanto, não se encontrou um que cumpra com os requisitos imposto para o sistema pretendido. Neste caso, essencialmente, pretende-se um veículo de reduzidas dimensões e peso para dispor de fácil portabilidade, menor consumo, facilidade de operação, manutenção/intervenção técnica, extensão e baixo custo. Ao mesmo tempo é crucial incidir nos pontos críticos desta tecnologia, a fim de conceber um veículo robusto e fidedigno. Pontos esses que passam por lidar com a pressão e com o meio subaquático em geral. Juntamente com todas as questões técnicas e de conceito pretende-se então desenvolver um AUV para complementar a oferta já existente, principalmente no nosso laboratório.

Capítulo 4

Especificação e Desenvolvimento

Neste capítulo vai-se proceder à apresentação de especificações relativas às partes constituintes do AUV, bem como se irá expor de forma pormenorizada a concretização do desenvolvimento dessas mesmas partes. Serão abordadas, com detalhe, questões técnicas acerca das características e da construção dos componentes seleccionados para o desenvolvimento do projeto. Na mesma vertente técnica vão-se demonstrar procedimentos de projeto, fabrico e construção do protótipo.

Depois de definido o conceito procede-se ao desenvolvimento do mesmo. Para isso são utilizadas ferramentas de *computer aided design* (CAD)/*computer aided manufacturing* (CAM) que permitem obter um modelo geral do veículo, onde figuram todas as peças mecânicas do mesmo. A partir desses desenhos é possível gerar código G para posterior fabrico em máquinas *computerized numerical control* (CNC). Neste projeto foram utilizadas duas destas máquinas: uma fresadora e um torno. Foi também utilizada uma impressora 3D para fabrico de algumas peças em plástico.

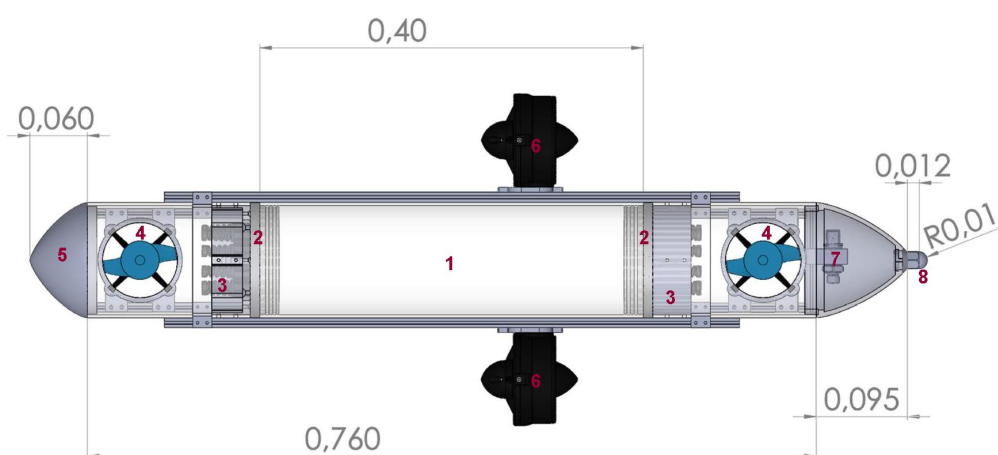


Figura 4.1: Projeção superior do AUV

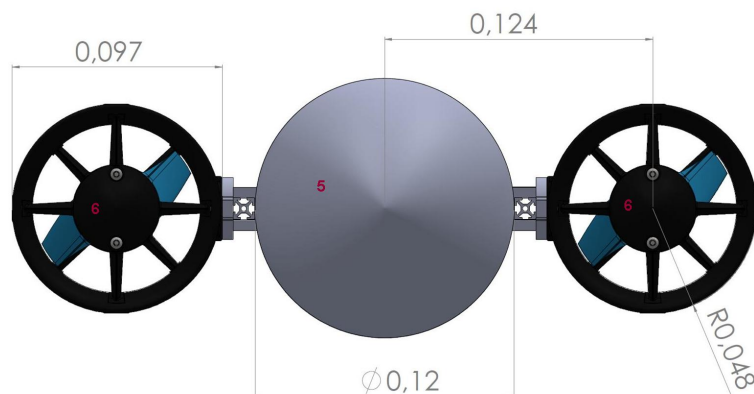


Figura 4.2: Projeção frontal do AUV

Nas Figuras 4.1 e 4.2 esquematizam-se os diferentes constituintes do AUV. As medidas estão em metros e a legenda das principais partes é a seguinte:

1. Cilindro central
2. *Endcaps*
3. Suportes estruturais
4. Módulos propulsores verticais
5. Nariz
6. Motores horizontais
7. Sensor de pressão
8. Ficha de carregamento de baterias.

4.1 Estrutura Mecânica

Descrevem-se agora os componentes enumerados acima.

4.1.1 Cilindro Central

O compartimento cilindro central tem como principal função criar um volume estanque, onde se alojam todas as partes que necessariamente não podem entrar em contacto com a água. Originando o chamado compartimento seco que é envolvido por um cilindro, em acrílico transparente, com as seguintes dimensões: 0,120 m de diâmetro exterior, 0,114 m de diâmetro interior e 0,400 m de comprimento. É no seu interior que se encontram os componentes eletrónicos e baterias. Dentro deste cilindro cresce uma estrutura constituída por *frames* de alumínio, acrílico e plástico com pouco atrito, pois é neste que são maquinados (ver Figura 4.3) os topos da estrutura e estes deslizam ao longo do interior do cilindro central, de acrílico. Estas peças juntas formam uma estrutura

fixa a só um dos *endcaps* para permitir a abertura e fecho do cilindro. Retirando esse *endcap*, a estrutura vem juntamente. O mesmo se passa quando montado, em que se empurra toda a estrutura que suporta a eletrónica e baterias ao longo do interior do cilindro, apoiando no *endcap*. Na Figura 4.4 está representado esse conjunto de componentes.

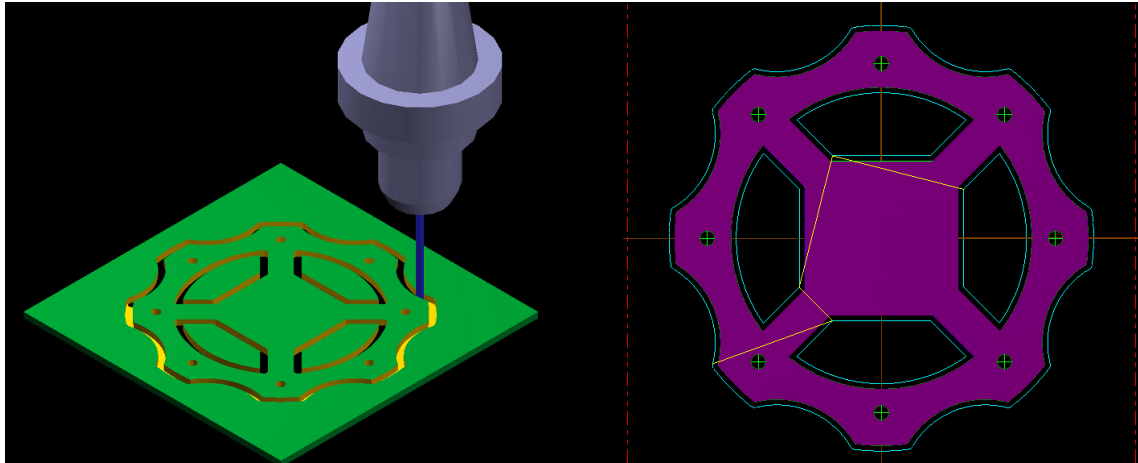


Figura 4.3: Simulação de fresagem e modelo CAD 2D dos topos da estrutura interna do cilindro central

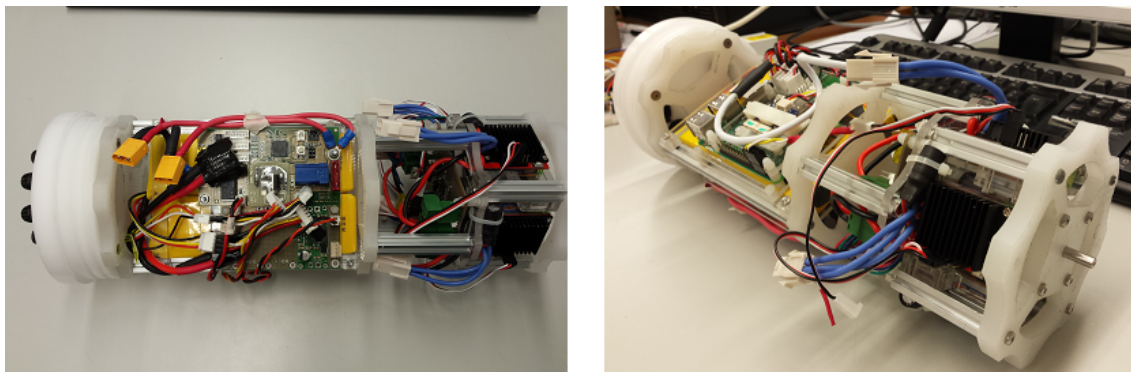


Figura 4.4: Estrutura central com eletrónica e baterias

4.1.2 Endcaps

Os *endcaps* são duas peças de revolução feitas em plástico polioximetileno (poliacetal) (POM) que servem para fechar o interior do cilindro central e torná-lo estanque. É também através destas peças que se medeiam o compartimento seco e o exterior molhado do veículo. A estas peças são apertados buçins que, através de vedantes, permitem passar cabos para o exterior do cilindro central de forma estanque.

Nestas peças encontram-se também pontos de fixação dos módulos localizados na secção seca, maioritariamente módulos eletrónicos e baterias.



(a) *Endcap* com *o-rings* de estanquicidade e sem buçins



(b) *Endcap* com buçins

Figura 4.5: Tampas *endcaps*

Foram fabricadas num torno CNC com o apoio de ferramenta computacional CAD/CAM. Uma imagem ilustrativa da simulação de maquinação da reentrância para *o-ring* pode ser observada na Figura 4.6.

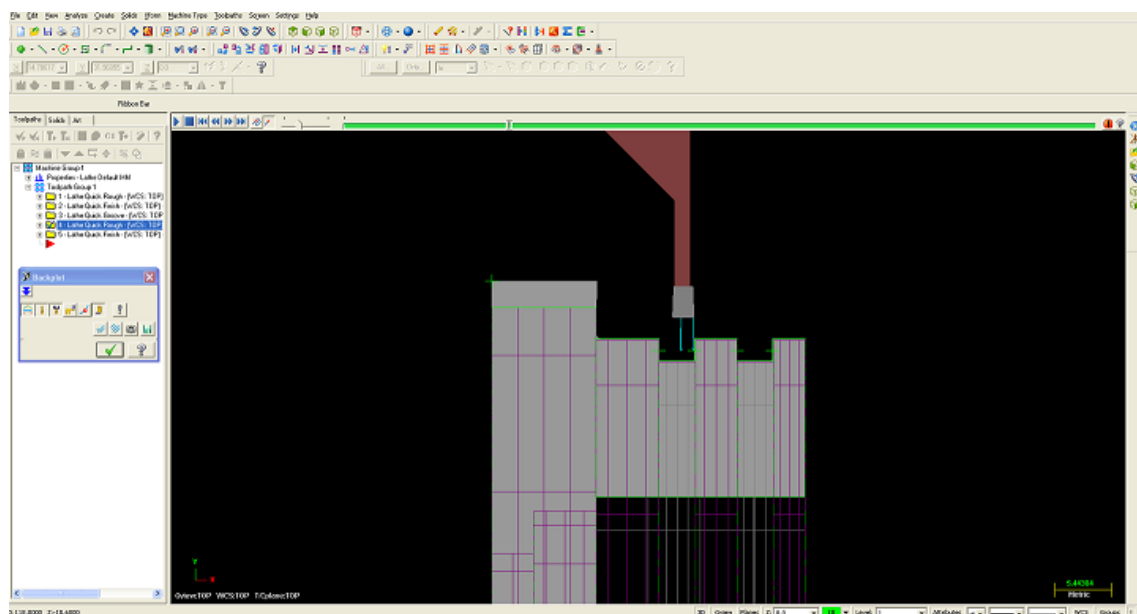


Figura 4.6: Simulação em ferramenta computacional CAD/CAM de operação em torno

4.1.3 Suportes Estruturais

Estes suportes estruturais são peças também de revolução mas com algum acabamento linear, no mesmo plástico POM e apertadas através de parafusos uma a cada *endcap*. Têm como função fixar os restantes módulos ao cilindro central. Em umas ranhuras laterais interiores apoiam-se

perfis quadrados, tal como apresentado na Figura 4.7. Por sua vez, estes servem de suporte aos restantes módulos e respetivas peças/partes. Exemplos desses perfis em alumínio podem ser vistos na Figura 4.15.



Figura 4.7: Suporte estrutural: realce da furação de fixação ao *endcap* e ranhuras de encaixe das *frames*

Estes suportes foram fabricados recorrendo a operações tanto na fresadora como no torno **CNC**, para assim se agilizar o fabrico. Mais uma vez recorrendo a software **CAD/CAM** elaboraram-se os ficheiros de código para posteriormente programar as **CNC**. Uma ilustração do ambiente gráfico deste tipo de software está representado na Figura 4.8.

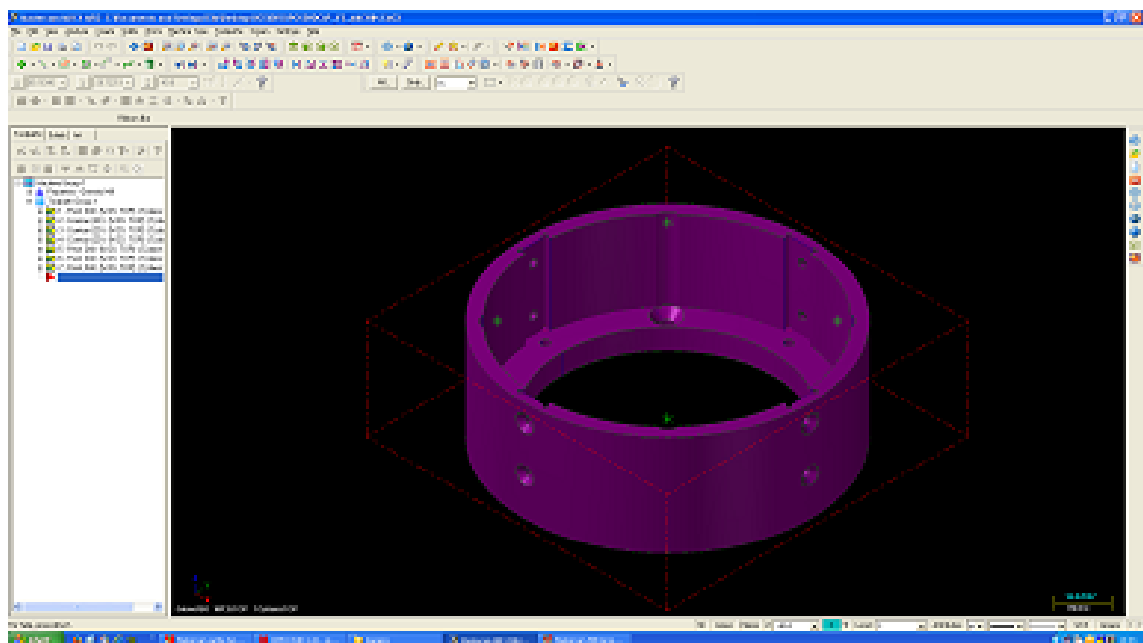


Figura 4.8: Exemplo de modelo 3D **CAD** de um suporte estrutural

4.1.4 Estrutura em Geral

A estrutura geral é formada pelos componentes já descritos juntamente com duas *frames* técnicas de perfil quadrado, com 0,01 m x 0,01 m x 0,60 m, colocadas lateralmente e em paralelo com as peças anteriores encaixadas. São fixas aos suportes estruturais por umas peças menores, servem para tornar a estrutura geral (cilindro central mais *endcaps* mais suportes estruturais) resistente e com restrição de movimento longitudinal (importante para o cilindro central não se abrir). Dá ainda bastante restrição rotacional, juntamente com o próprio atrito dos *o-rings* dos *endcaps* e de mais dois tirantes em alumínio que também são montados na mesma direção, mas rodados 90°. Nas referidas *frames* apoiam-se os dois motores horizontais, permitindo também a variação da posição destes ao longo do seu comprimento.

4.1.5 Design do Nariz e da Cauda

Dada a forma de torpedo do AUV, este tipo é geralmente cilíndrico na maioria do seu comprimento e os topos são fechados com peças das mais variadas formas, por exemplo, achatada, cônica, esférica, parabólica e combinações destas. Com estas formas pretende-se o menor atrito viscoso possível para aumentar a eficiência do veículo quando se move. Para o projeto foi decidido usar peças com geometria baseada na curva de Von Karman Ogive. Esta curva não é uma forma geométrica comum mas provém de formulação matemática, nomeadamente da série de Haack, com o intuito de minimizar o atrito viscoso [12]. As equações que definem a série são as seguintes:

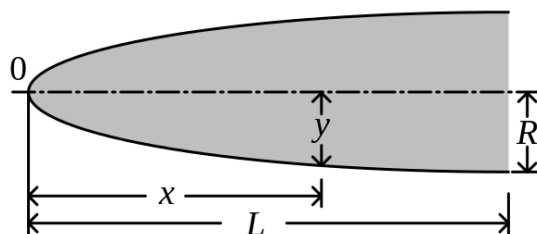


Figura 4.9: Dimensões da forma do nariz e cauda

$$\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2x}{L}\right) \quad (4.1)$$

$$y = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\theta - \frac{\sin(2\theta)}{2} + C \sin^3 \theta} \quad (4.2)$$

Cada valor de C na equação 4.2 corresponde a uma curva diferente. A $C = 1/3$, LV-Haack, corresponde uma minimização do atrito para um determinado comprimento e volume. Por sua vez, quando $C = 0$, LD-Haack, tem-se um atrito mínimo para um determinado comprimento e diâmetro e é com este valor que a curva é conhecida por Von Karman Ogive. Este valor de C é interessante para o projeto das peças em questão, já que se pretende fixar o diâmetro e variar o comprimento das peças (mínimo) conforme seja o nariz, mais curto, ou a cauda, mais longa. Dimensionaram-se as peças conforme a Figura 4.10, sendo que o nariz, a menos do encaixe, tem o comprimento igual ao raio. A cauda tem o comprimento maior devido a ser necessário alocar no seu interior o sensor de pressão, a ficha de carregamento de baterias e também por questões hidrodinâmicas (a forma em gota).

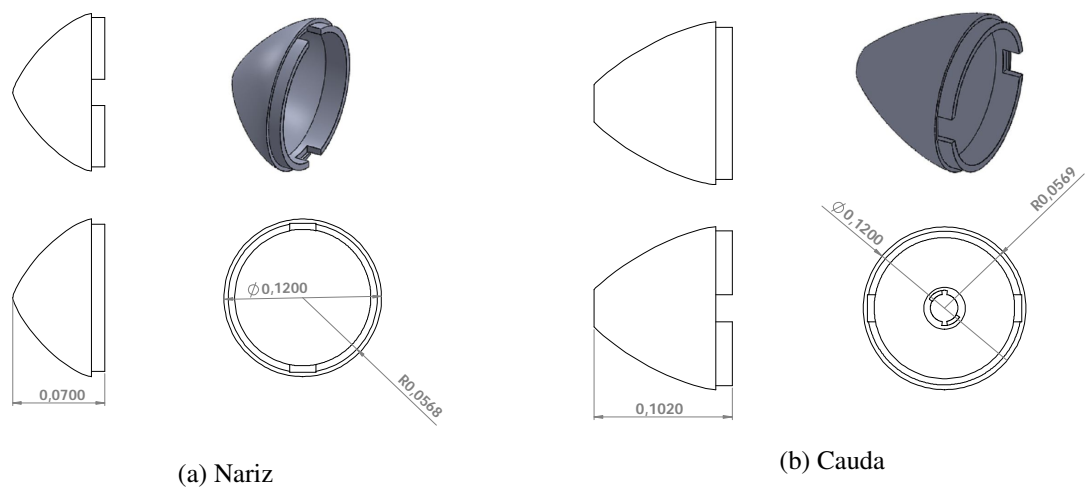


Figura 4.10: Dimensões das peças nariz e cauda

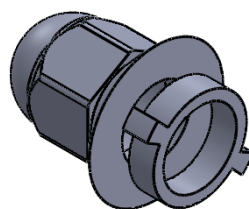


Figura 4.11: Peças impressas para o suporte da ficha de carregamento

Depois de dimensionadas e de feito o CAD, estas peças foram impressas numa impressora 3D. O corpo da ficha de carregamento de baterias provém de uma solução comercial impermeável, as *Bulgin 400 Series Buccaneer®* (ver Figura 4.12), em que a impermeabilidade é garantida pelo fabricante quando fichas macho e fêmea estão ligadas. Ora, não se pretende carregar as baterias com o veículo submerso, mas sim garantir que quando a ficha não está ligada e o AUV em operação, não há infiltrações de água. Para isso, o que se fez foi encher com resina de epóxi uma ficha fêmea e fazer esta servir de tampa para vedação da ficha macho que serve de terminal de

carregamento. Posteriormente, foram impressas também outras peças (ver Figura 4.11) e coladas ao corpo da ficha fêmea para finalizar um encaixe/suporte rápido de todo o conjunto.

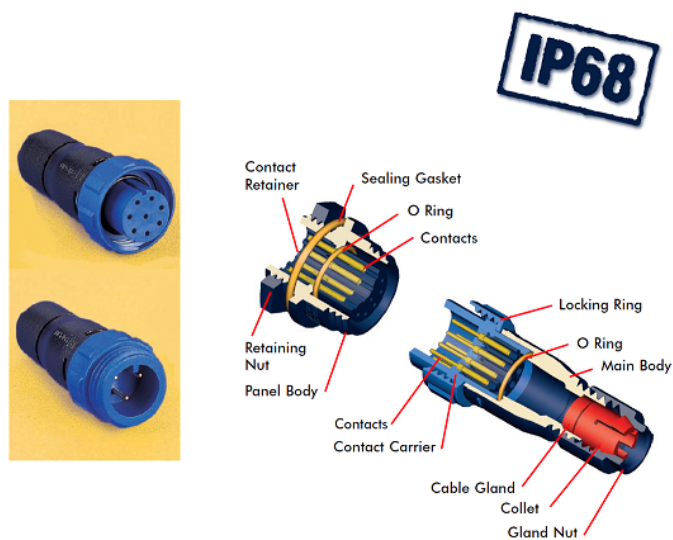


Figura 4.12: Fichas aplicadas em cabo para carregamento de baterias

4.2 Atuadores, Sensores e Eletrónica

Nesta secção vai-se proceder à descrição geral dos componentes elétricos e eletrónicos do AUV (Figura 4.13), detalhes técnicos tais como esquemas de circuitos e aspetos inerentes à sua construção. Serão também apresentadas imagens ilustrativas dos mesmos.

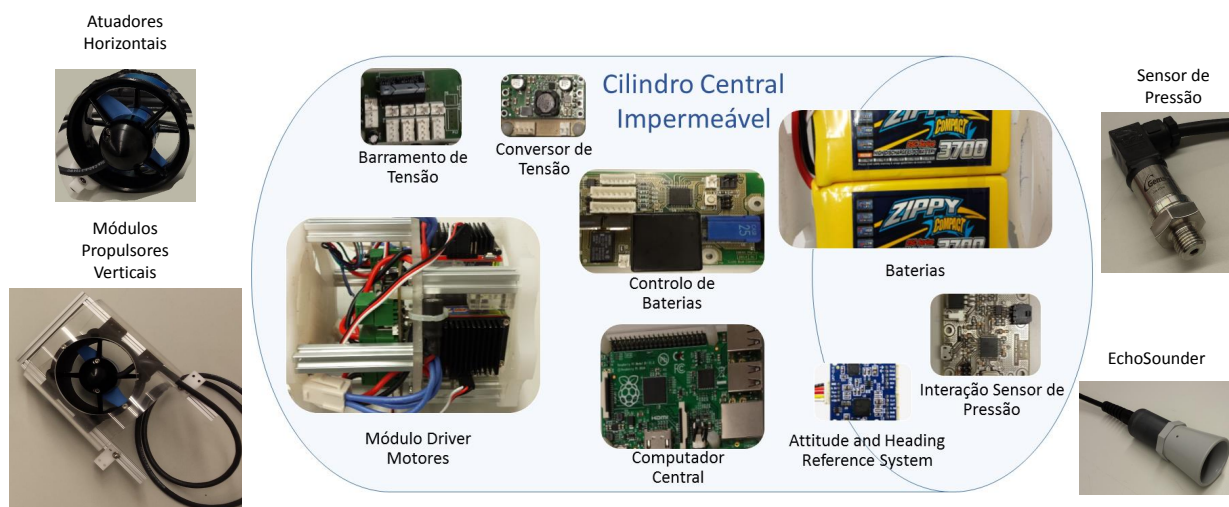


Figura 4.13: Disposição do sistema elétrico

4.2.1 Motores Propulsores

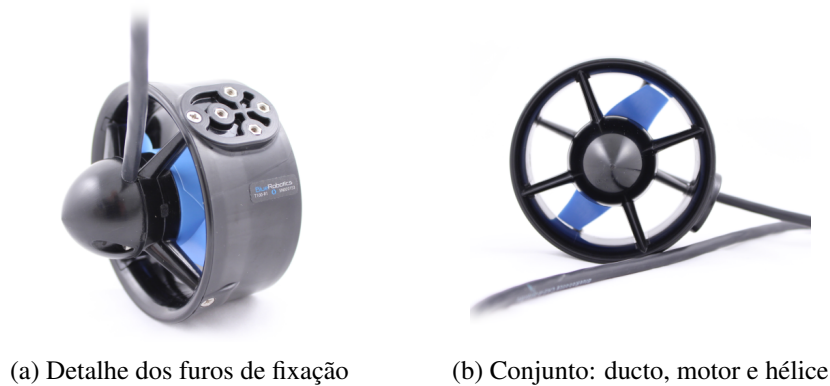


Figura 4.14: *Thrusters* originais

São utilizados dois *thrusters* na configuração original, isto é, o motor, a hélice e o ducto conforme são comercializados (ver Figura 4.14), para atuação na direção horizontal. Outros dois *thrusters* são usados para atuação na direção vertical, mas apenas os motores e as hélices originais, para integrar os módulos descritos em 4.2.2. São motores tipo *brushless*, de baixo custo, próprios para integrar em robôs marítimos e com as características da Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características dos motores de propulsão

Máx. força de propulsão no sentido mais eficiente	23 N
Máx. força de propulsão no sentido menos eficiente	18 N
Mín. força de propulsão	0,1 N
Tensão de operação	6 a 16 V
Corrente máx.	12,5 A
Potência máx.	135 W

4.2.2 Módulos Propulsores Verticais

O veículo possui dois destes módulos, ver Figura 4.15 . Cada um é constituído por um motor elétrico *brushless* com uma hélice acoplada ao veio e colocados no interior de um ducto. Estes ductos foram desenvolvidos recorrendo a ferramenta CAD, impressos na impressora 3D e a furação para passagem do cabo de alimentação e fixação do motor foram feitas manualmente. O conjunto motor mais ducto, por sua vez, encontra-se envolto por um cilindro de acrílico transparente, semelhante ao usado como cilindro central, mas mais curto, e com duas aberturas laterais por onde circula o fluxo de água. Estas aberturas foram maquinadas na fresadora CNC. Uma ilustração dos constituintes de um destes módulos desmontado pode ser visualizada na Figura 4.16.

4.2.4 Motor de Passo

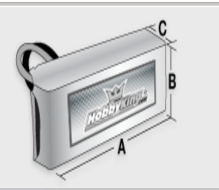
Foi integrado também, dentro do módulo *driver* de motores descrito em 4.2.8 um motor de passo e seu controlador. Isto foi feito para permitir o controle de uma massa dentro do cilindro central e consequentemente compensar ou até controlar o *roll* do veículo.

4.2.5 Baterias



(a) Exemplo de uma bateria

Capacity(mAh)	3700
Config (s)	3
Discharge (c)	25
Weight (g)	264
Max Charge Rate (C)	5
Length-A(mm)	146
Height-B(mm)	19
Width-C(mm)	43



(b) Especificações da bateria

Figura 4.17: Bateria de Li-po

Para dispor da energia necessária ao seu funcionamento, o AUV dispõe de duas baterias de Li-po ligadas em paralelo, tais como a da Figura 4.17. Cada bateria tem uma capacidade de 3,7 Ah e é constituída por três células de 3,7 V. Nestes modelos de baterias, o fator C refere-se sempre à capacidade das mesmas. Estas como são 25C permitem debitar uma corrente elétrica contínua de 25 vezes 3,7 A, podendo ser carregadas no máximo a 5 vezes 3,7 A, 5C. No entanto não é aconselhável carregar a bateria com mais do que 2C, já que correntes de carregamento elevadas diminuem a longevidade das mesmas.

4.2.6 Sensores



Figura 4.18: Sensor de pressão

- **Sensor de pressão** - Representado na Figura 4.18, trata-se de um sensor para aplicações industriais que envolvam medição de pressão de água, ar ou outro gás. Através deste sensor

obtem-se medidas de pressão da água, que serão proporcionais à profundidade a que o AUV se encontra. Fornece medidas de valor absoluto e a sua saída é uma corrente elétrica proporcional à pressão. Este tipo de sensor normalmente apresenta um sinal de saída menos ruidoso do que sensores com sinal de saída em tensão. O seu baixo custo face a outros sensores dedicados à aplicação em robôs submarinos foi um fator que levou a sua escolha, juntamente com as principais características, presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características do sensor de pressão

Pressão máx.	6,0 bar
Precisão	0,25 %
Saída analógica	4 a 20 mA
Tensão de alimentação	10 V a 30 V, CC
Material exterior	Aço inoxidável

A profundidade a que o AUV se encontra é uma informação de extrema importância e indispensável para o estabilizar na coluna de água. A leitura da profundidade consegue-se através da medição da pressão da água junto ao veículo. Para isso é utilizado, então, o sensor de pressão. A solução encontrada foi a de escolher um sensor, de entre vários comumente usados em automação, com determinadas características pretendidas. O que melhor se ajustou foi o que tem as características da Tabela 4.2. No final o menor preço e a facilidade logística da compra levaram à decisão final. Um requisito de projeto que o sensor escolhido não cumpria era a capacidade de ser submerso a alguns metros de profundidade. Esta é uma característica que encarece a maioria dos dispositivos. A parte do sensor que fica em contacto com a água já está preparada para a gama de pressões indicadas e consequentemente para as profundidades desejadas. Para tornar o sensor completamente estanque, o conector e extremidade do cabo de ligação (assinalados na Figura 4.19) foram sujeitos a um processo que envolveu o enchimento dessas partes com resina epóxi.



Figura 4.19: Conector do sensor de pressão selado com epóxi

O próximo passo seria desenvolver um hardware que possibilitasse a leitura do valor da pressão. O mesmo está descrito em 4.2.7 no item **Interação com Sensor de Pressão**.

- **AHRS** - É o sensor de orientação UM7-LT da CH Robotics constituído pelos seguintes *microelectromechanical systems* (MEMS): acelerómetro, giroscópio e magnetómetro. Enquanto que um IMU apenas disponibiliza diretamente as medidas provenientes destes sensores, o AHRS já possui um microcontrolador com um sofisticado EKF que combina as medidas dos sensores e em um segundo estima quinhentas vezes a orientação. Esta divide-se em *attitude* (ângulos de *pitch* e *roll* em relação ao vetor gravidade) e *heading* (ângulo em relação ao norte geográfico - azimuth). Com melhoramentos de *performance* e redução de custo, conta ainda com as características da Tabela 4.3.

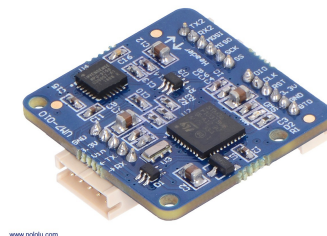


Figura 4.20: Sensor de orientação inercial

Tabela 4.3: Características do sensor de orientação

Especificações de <i>attitude</i> e <i>heading</i>	
Taxa de estimação do EKF	500 Hz
Exatidão estática típica de <i>pitch/roll</i>	$\pm 2^\circ$
Exatidão dinâmica típica de <i>pitch/roll</i>	$\pm 4^\circ$
Exatidão estática típica de <i>yaw</i>	$\pm 5^\circ$
Exatidão dinâmica típica de <i>yaw</i>	$\pm 8^\circ$
Repetibilidade de ângulo	$0,5^\circ$
Resolução angular	$0,01^\circ$
Saída de dados	
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Attitude</i> e <i>heading</i> - Ângulos de Euler • Quaternião de <i>Attitude</i> • Altitude GPS • Posição e velocidade com GPS externo • Dados diretos do acelerómetro, giroscópio e do magnetómetro 	
Outras especificações	
Tensão de alimentação	4 V a 5,5 V
Dimensões	27 mm x 26 mm x 6,5 mm
Peso	3,5 g (sem cabos)
Comunicações	3,3 V TTL UART, SPI bus

Este é disposto em *stack*, por cima do computador central, e é fixado através de umas peças suporte impressas em 3D.

- **Echosounder** - Adaptou-se um *echosounder* (Figura 4.21) (para funcionamento no ar) ao meio subaquático, através da criação de um compartimento e posterior enchimento de resina epóxi para dar impermeabilidade ao circuito elétrico do sensor. Este sensor pode ser usado para implementar capacidades de desvio de obstáculos.



Figura 4.21: Echosounder para funções de desvio de obstáculos

4.2.7 Eletrónica

Composta maioritariamente por circuitos elétricos concretizados em placa de circuito impresso (PCB), dispostos dentro do cilindro central, distendidos e em *stack*, e assentes em bases de acrílico maquinadas e furadas. Tendo em conta sempre que possível uma disposição uniforme e simétrica dos componentes (ver Figura 4.4).

Em termos de eletrónica o AUV conta com os seguintes circuitos:

- **Computador central** - Como unidade central de computadorização é utilizado um *Raspberry Pi 2 Model B*, com um cartão de memória flash microSD de 16 GB no qual está instalado um OS baseado em *Debian*, o Raspbian.

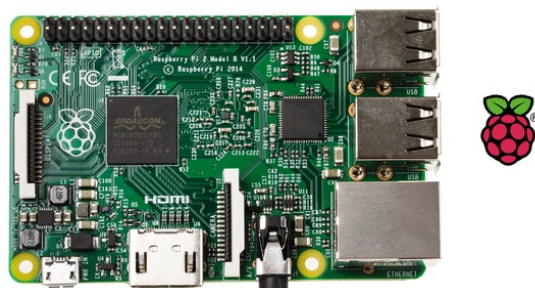


Figura 4.22: Raspberry Pi 2 Model B usado como computador central

- **Controlador de baterias** - Placa de circuito já desenvolvida e que foi integrada para obter informação sobre as baterias, como por exemplo a tensão em cada célula e a corrente total

que está a ser drenada das baterias. Posteriormente esta informação é processada num microprocessador presente nesta placa ou pode ser enviada ao computador central por porta série. Também corta a alimentação caso a tensão de uma célula da bateria seja menor que um valor predefinido.

- **Conversor de tensão CC** - É uma placa, anteriormente desenvolvida, que permite instalar vários conversores de tensão comerciais e desta forma transformar a tensão contínua proveniente das baterias em valores de tensão apropriados ao funcionamento dos restantes circuitos. Pode-se observar na Figura 4.23 apenas um conversor CC-CC de 5 V instalado, havendo espaços para instalar outros conversores.

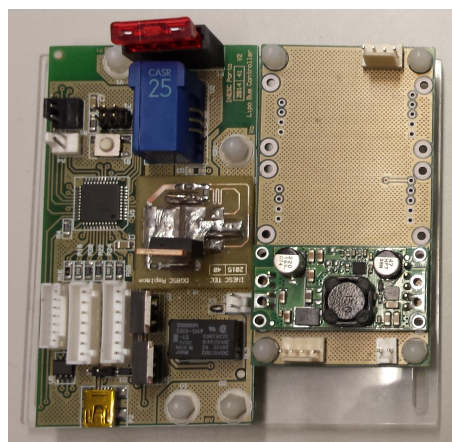


Figura 4.23: Placa de controlo de baterias e conversor CC-CC

- **Barramento de tensão** - Trata-se de uma PCB ilustrada na Figura 4.24 onde estão várias fichas do tipo KK a partir das quais se ligam os conectores de alimentação de outros circuitos.



Figura 4.24: Barramento de tensão junto ao computador central

- **Interação com sensor de pressão** - A função deste circuito elétrico é obter informação do sensor de pressão num formato próprio para ser transmitida ao computador central. Esta placa foi totalmente desenvolvida ao logo da dissertação e os procedimentos encontram-se em 4.2.9.

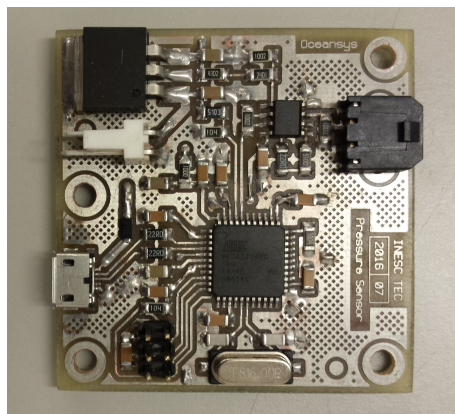


Figura 4.25: Placa de interação com sensor de pressão

- **Drivers de motores** - Os *drivers* dos motores são pequenos controladores de velocidade para motores *brushless*, também designados por *electronic speed control* (ESC), utilizados para comandar os motores do veículo. São portanto necessários quatro, um para cada motor, e permitem controlar velocidade nos dois sentidos. Caracterizam-se por possuírem funções de segurança em caso de baixa tensão, sobreaquecimento, perda de sinal de comando, proteção de arranque e auto verificação. Têm uma excelente *performance* no arranque e respondem de forma rápida e linear aos comandos recebidos. São de fácil configuração e automaticamente detetam o ponto neutro de comandos, mas permitem também ajustar a gama neutra. Seu peso é de 0,051 kg, a tensão de alimentação pode variar entre 5 e 13 V e podem fornecer até 30 A de corrente CC.

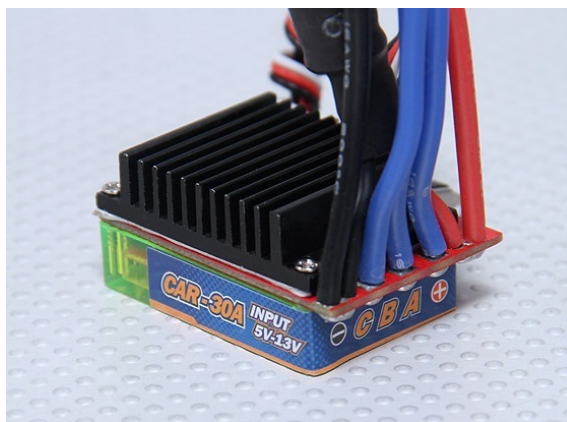


Figura 4.26: Exemplo de *driver* de um motor

4.2.8 Desenvolvimento do módulo driver de motores

Para desenvolver e produzir o módulo final, começa-se por definir os componentes que deverão integrá-lo. Dado que o AUV terá quatro motores propulsores torna-se necessário incorporar quatro dos já referidos ESC (ver Figura 4.26) para comandar cada motor. A forma como se enviam os comandos, provenientes do computador central, a cada ESC passa por centralizar mensagens numa PCB (já desenvolvida, apenas foi integrada), que também será instalada no módulo. Por sua vez, esta, através de uma camada de software programada num microcontrolador, descodificam-se as mensagens e encaminham-se os comandos ao respetivo ESC. Esta placa possui também sensores que permitem medir a corrente elétrica fornecida a cada ESC.

A estrutura que se apresenta na Figura 4.27 foi construída recorrendo ao fabrico de pequenas peças em acrílico que serviram para criar um suporte interno onde foram aparafusados os ESC. Exteriormente, foram maquinadas duas *frames* (0,114 m de diâmetro), uma em plástico de baixo atrito (para deslizar ao longo do cilindro central) e outra em acrílico (por ser mais rígido que o plástico), unidas por perfis em alumínio (0,01 m x 0,01 m x 0,060 m), por forma a abraçar os componentes e dar robustez ao módulo. A PCB é fixada na *frame* de acrílico.

No interior deste módulo foi ainda instalado um motor de passo e um circuito elétrico, que serve de *driver* a este, para trabalho futuro. Mais pormenores acerca deste trabalho são discriminados em 4.4.

Este módulo encaixa no interior do cilindro central e está fixo à restante eletrónica.

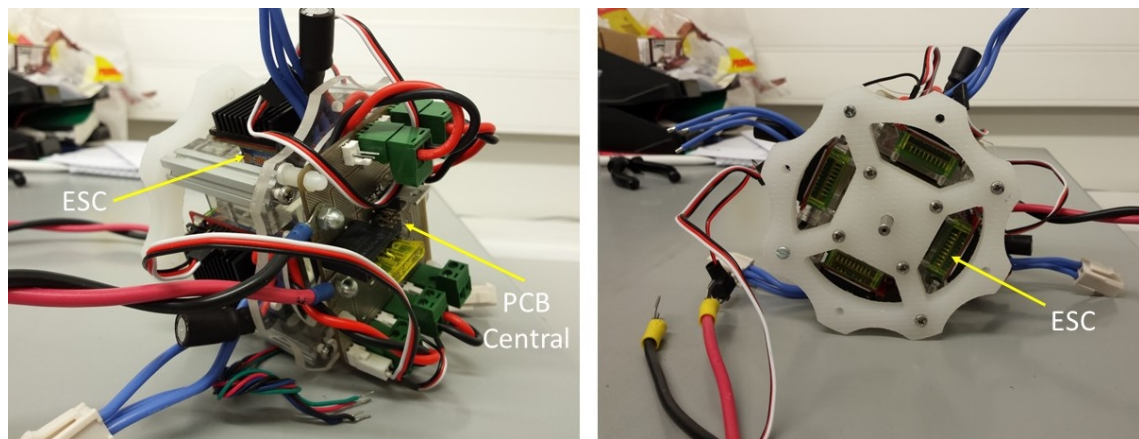


Figura 4.27: Módulo *driver* de motores

4.2.9 Desenvolvimento do circuito de interação com sensor de pressão

Definiu-se que este *hardware* devia permitir adquirir e condicionar o sinal analógico, converter esse sinal para um formato digital e ser programável. Deveria ainda ser possível comunicar com este *hardware* através de uma ligação série. Tal, implica desenvolver um *driver* através do fabrico de uma PCB (ver Figura 4.25) com os principais componentes descritos no diagrama seguinte:

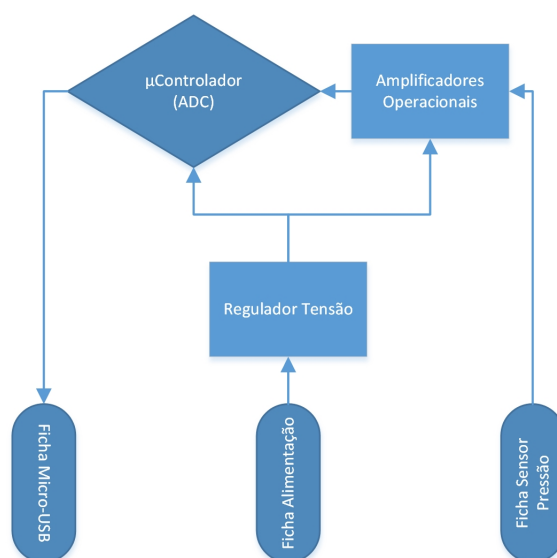


Figura 4.28: Diagrama do *hardware driver* do sensor de pressão

O sensor de pressão fornece um sinal em corrente proporcional à pressão que lhe é imposta. O primeiro passo é adquirir esse sinal convertendo-o para um sinal de tensão. Para isso dimensionou-se uma resistência, que por sua vez foi ligada em série com o sensor para originar uma queda de tensão. Através de um amplificador operacional (**AmpOp**) em configuração seguidora de tensão faz-se o desacoplamento de impedâncias entre a aquisição e o posterior condicionamento. Este é feito através de um outro **AmpOp**, em configuração inversora e diferenciadora, responsável por aplicar um ganho e um *offset* ao sinal adquirido. A Figura 4.29 representa uma simulação de uma parte do circuito desenvolvido, em que o sensor de pressão e a fonte de tensão que o alimenta (ligados em série) estão representados por uma fonte de corrente.

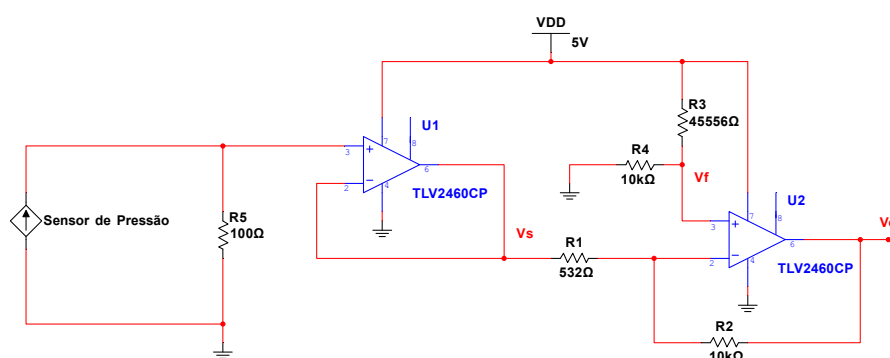


Figura 4.29: Circuito de aquisição e condicionamento de sinal do sensor de pressão

A gama do sinal de saída do sensor em corrente varia entre 4 e 20 mA, sendo que a esta corresponde uma gama de pressão com extremos em 0 e 6,0 bar respectivamente. Como o sensor é linear, pode-se estabelecer a relação 2,66 mA/bar. Para o **AUV** em particular interessa a gama

de pressão entre 1,0 bar a que correspondem $4 + 2.66 = 6,66 \text{ mA}$ à superfície e 2,0 bar a que correspondem $4 + 2 \times 2.66 = 9,32 \text{ mA}$ para uma profundidade máxima de 10 metros. À variação da pressão de 1 bar corresponde aproximadamente uma variação de 10 m na coluna de água. Embora esta unidade de pressão não seja SI, é utilizada devido à relação direta com a profundidade. Esta relação é afetada pelas características da água, como temperatura e concentração de sais.

O sinal já em tensão terá de ser condicionado de forma a maximizar a resolução da medida de profundidade. Para isso é necessário parametrizar um ganho que faça a gama de sinal preencher completamente a gama de leitura do conversor analógico-digital (ADC) através do qual o sinal vai ser digitalizado. Um *offset* também tem que ser parametrizado para fazer coincidir os extremos da gama de profundidade pretendida, 0 e 10 m, com os da gama de leitura do ADC, 0 a 5 V. Para implementar tais parâmetros torna-se necessário dimensionar as resistências elétricas do circuito segundo as seguintes equações:

$$V_o = V_f(1 + \gamma) - V_s\gamma \quad (4.3)$$

$$V_f = 5 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (4.4)$$

$$V_s = RI_{\text{sensor}} \quad (4.5)$$

$$\gamma = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.6)$$

Com as seguintes condições:

$$0 \text{ m de profundidade} \begin{cases} V_o = 5 \text{ V} \\ I_{\text{sensor}} = 6,66 \text{ mA} \end{cases}$$

$$10 \text{ m de profundidade} \begin{cases} V_o = 0 \text{ V} \\ I_{\text{sensor}} = 9,32 \text{ mA} \end{cases}$$

Fixando o valor de $R_5 = 100 \Omega$ e substituindo os valores das condições apresentadas, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} 0 = V_f(1 + \gamma) - 0.932\gamma \\ 5 = V_f(1 + \gamma) - 0.666\gamma \end{cases}$$

Resolvendo:

$$\begin{cases} V_f = 0,885 \text{ V} \\ \gamma = 18.8 \end{cases}$$

Fixando o valor da resistência $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ e resolvendo a equação 4.4 determina-se o valor de $R_3 = 45,556 \text{ k}\Omega$. Por sua vez, convencionando $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ e resolvendo a equação 4.6 obtém-se o valor da resistência $R_1 = 532 \Omega$. Fica então completo o circuito da Figura 4.29. Juntamente com

este circuito pretende-se implementar um outro para então converter o sinal analógico em digital, poder desenvolver um programa para tratamento do sinal e seguidamente transmiti-lo. A solução passa então por integrar na mesma **PCB** o microcontrolador ATMEGA32U4. Este já possui o **ADC** necessário e comunicação série. Em relação aos **AmpOp** utilizam-se os dois presentes no chip TS912I. O que motivou a escolha deste foram valores da gama de alimentação e característica *rail to rail*. A maior preocupação durante o desenvolvimento desta **PCB** foi minimizar as suas dimensões. Para isso optou-se, sempre que possível, por componentes de dimensões diminutas. Por exemplo, resistências tipo SMD, chips com encapsulamento TQFP para o microcontrolador e SOIC para os **AmpOp**. A alimentação é feita através do regulador de tensão LP2954IS que recebe níveis de tensão das baterias e fornece 5 V. O *layout* desenvolvido apresenta-se na Figura 4.30.

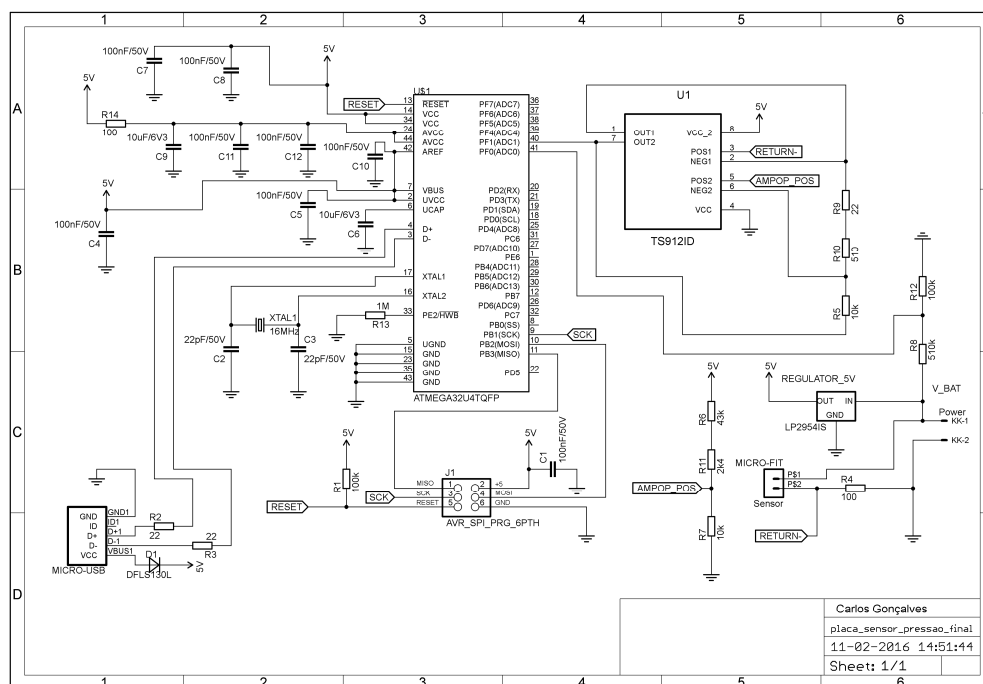


Figura 4.30: *Layout* da **PCB** fabricada para interação com sensor de pressão

4.3 Camadas de Software

O *software* utilizado segue na sua generalidade uma arquitetura modular, tal como a representada na Figura 4.31, já desenvolvida e utilizada no laboratório. As camadas de nível superior consistem em vários processos independentes e que comunicam entre si por *user datagram protocol* (**UDP**) e através de protocolos também desenvolvidos no laboratório. As camadas mais baixas comunicam com as superiores por porta série ou conversores **ADC**, no caso de alguns sensores físicos. Os módulos e comunicações desenvolvidos ao longo deste trabalho foram ao nível das camadas de *drivers* de dispositivos (no **PC** e no dispositivo) e dos sensores e atuadores físicos, nomeadamente para o sensor de pressão e para o módulo *driver* de motores. De referir que no

driver da placa de interação com o sensor de pressão (*driver* no dispositivo) foi programado um filtro de média através de um *buffer* circular implementado em memória dinâmica.

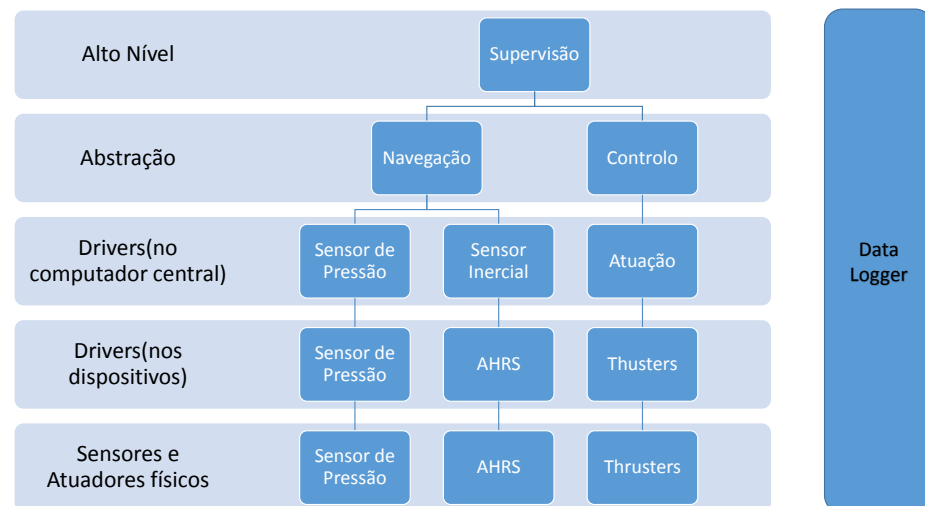


Figura 4.31: Arquitetura do *software* utilizado

4.4 Conclusão

O **AUV** foi construído e foi-lhe dada a designação de *Small Hovering Auv with Differential actuation* (**SHAD**). Ao longo do desenvolvimento do **SHAD** todos os elementos possíveis de serem isoladamente testados o foram, podendo-se considerar à partida o **SHAD** como o resultado da construção de um robô submarino com 0,12 m de diâmetro, 0,9 m de comprimento, combinados com 6,0 kg de peso, apresentado na Figura 4.32.

Inicialmente, queria-se o centro de massa próximo do centro geométrico para depois se implementar um controlo de *roll*. Esse controlo seria feito através da variação da posição angular de uma massa dentro do cilindro central, acoplada a um veio por meio de uma haste que a tornasse excêntrica. Esta é que iria afastar o centro de massa do centro geométrico do **AUV**, com posterior controlo da mesma ao longo de um raio de ação (distância entre a massa e o veio do motor que a atua). Dado que esta parte não foi implementada e para manter a estabilidade do ângulo de *roll*, adicionou-se uma massa para afastar então o centro de massa do centro de flutuação, que coincide com o centro geométrico do volume de água deslocado. O centro de flutuação do **AUV**, quando totalmente submerso, coincide com o seu centro geométrico.

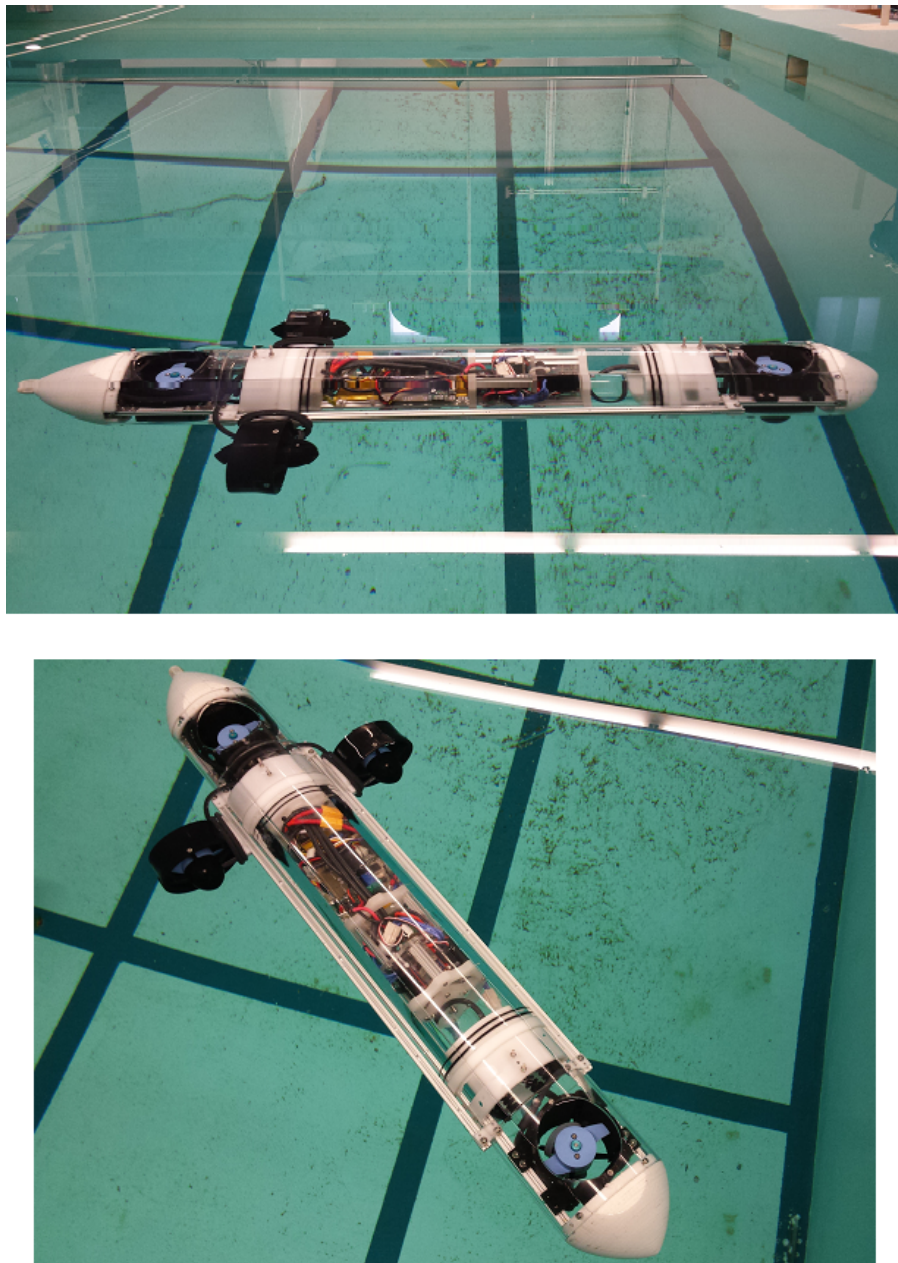


Figura 4.32: Batismo do SHAD

Capítulo 5

Testes e Resultados

5.1 Introdução

Depois de construído o [SHAD](#), procedeu-se à realização de testes para obtenção de resultados e validação. Os testes de obtenção de resultados foram pensados para incidir no sensor de pressão, nos *thrusters* e no sensor inercial [AHRS](#). São esperados resultados de medidas de profundidade com o teste do sensor de pressão, medidas de força exercida e corrente consumida com o teste dos *thrusters* e medidas de ângulos de yaw e pitch com o sensor inercial.

Os testes para validação de resultados recaíram sobre os resultados anteriores e sobre a estanquidade do cilindro central, flutuação e centro de gravidade.

5.2 Testes

5.2.1 Teste de flutuação

Primeiro teste a ser feito, depois de tudo montado, é o teste de validação de flutuação. Analiticamente, através do volume aproximado e peso do veículo, determinou-se que flutuava. No entanto, é importante validar este resultado visto que se fizeram aproximações. Então colocou-se o [SHAD](#) no tanque de testes (tal como na Figura 4.32) e foi-se adicionando e registando o peso adicionado até começar a afundar. Assim obtém-se a força resultante entre o peso do veículo e peso do volume de água deslocado, a impulsão, e consequentemente a força de flutuação. Por outro lado, houve um “exercício prático” de *trimming*. Este é necessário porque os componentes foram dispostos através de inspeção visual (embora a disposição poderia ter sido alvo de um estudo mais minucioso) e é preciso compensar algum desequilíbrio que possa existir.

5.2.2 Teste de estanquidade

Segue-se o teste de validação de estanquidade, em que se ata uma âncora ao [SHAD](#) e se leva a profundidades cada vez maiores, durante intervalos de tempo também gradualmente maiores, emergindo entre estes e inspecionando se há vestígios de água no seu interior.

5.2.3 Teste para determinação prática e validação do centro de massa

Ao controlo do veículo está associado um modelo do mesmo, implementado em *software*, já desenvolvido previamente no laboratório. Esse modelo precisa de parâmetros para ser adaptado ao **SHAD**. Parâmetros esses que estão relacionados com a geometria e dimensões do veículo. Torna-se necessário então, ensaiar o veículo a fim de obter parâmetros sobre centro de massa. O teste feito consistiu em apoiar o cilindro central numa superfície cilíndrica e procurar o ponto de equilíbrio.

5.2.4 Teste de *thrusters*

Concluídos os testes anteriores e validados os resultados, efetua-se um teste/caracterização dos *thrusters* com a finalidade de obter a relação entre comandos, força e corrente. Monta-se um *setup* tal como o da Figura 5.1, que envolve ancorar o **SHAD** com um peso conhecido e, através de uma haste de fixação, pendurá-lo na vertical em uma balança. Enviam-se comandos aos motores em teste (horizontais) e regista-se o peso obtido e a corrente consumida. Através da equação $\text{Força resultante} = \text{Peso da âncora} + \text{Força de flutuação} + \text{Força dos thrusters}$ obtém-se a força exercida por dois *thrusters*. Este teste é feito com o envio de comandos e receção de dados *online* graças a um ponto de acesso subaquático com dois terminais impermeáveis ligados por um fio subaquático. Desenvolvido por investigadores do laboratório, em que um dos terminais fica à superfície ligado à rede local e o outro, que tem um pequeno alcance (10 a 20 cm) de rede *internet* sem fios debaixo de água, é acoplado ao **SHAD** e permite uma ligação submersa à rede. Registaram-se os dados referentes aos dois *thrusters* testados e assumem-se os mesmos resultados para os outros dois.

5.2.5 Testes ao sensor de pressão e sensor inercial no sistema global

Para validar o sensor de pressão, seria necessário realizar um teste de validação de resultados independentemente do sistema global, com uma análise rigorosa e comparando os resultados com medidas independentes que serviriam de *ground-truth* (através de um outro sistema de medida de profundidade). O mesmo teria de acontecer para o sensor inercial, por exemplo através de um sistema tipo transferidor para medir ângulos. Na impossibilidade imediata de dispor tais sistemas, os testes que foram feitos a estes sensores foram juntamente com um teste para validar o sistema como um todo, sem validação (e calibração) por comparação com sistema de medida externo ao **SHAD**.

Assim, os testes seguintes envolveram a importação de controladores, já desenvolvidos, para funcionamento do sensor de pressão e do **AHRS** no sistema, juntamente com *software* do modelo de **AUV**, navegação e *logger*. Através de *scripts* de missão são planeados os testes definindo-se referências para os controladores (exemplo da Figura 5.2). Posteriormente o **SHAD** irá tentar seguir estas referências e os dados são registados no computador central através do *software* de *logger*.

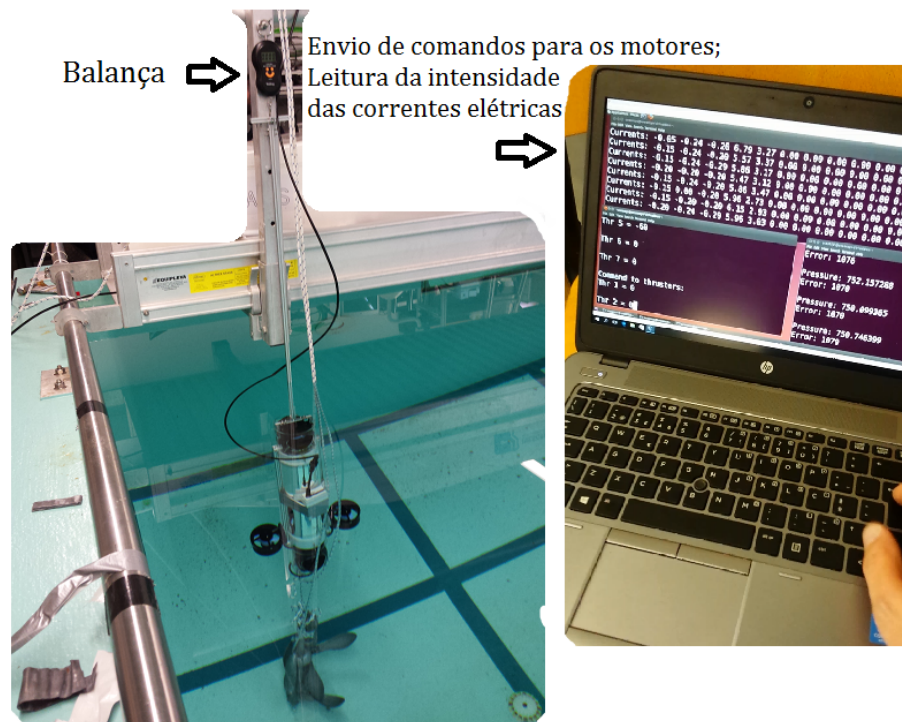


Figura 5.1: Teste e caracterização dos *thrusters*

5.3 Resultados

5.3.1 Resultados do teste de estanquidade, flutuação e ao centro de massa

Do teste de estanquidade comprovou-se que efetivamente não havia entradas de água na parte impermeável do sistema. Do teste de flutuação resultou a adição de uma massa de volume desprezável e 0,6 kg que serviu para equilibrar a flutuação do **SHAD** e também baixar o centro de massa. Do ensaio para determinar parâmetros conclui-se que o centro de massa situa-se aproximadamente no centro geométrico, tal como esperado devido à simetria do **SHAD** e à tentativa de distribuir uniformemente o peso dos componentes. A determinação prática do centro de massa, nos eixos horizontais, deu o resultado de $[x, y] = [-0.460, 0]$, no referencial com origem no nariz do **AUV** e sentido habitual dos eixos.

Existem ainda algumas formas de ajustar estes parâmetros, variando a posição dos *thrusters* horizontais e acrescentando materiais mais ou menos densos, por forma a alterar a flutuação. Inicialmente tinha 0,7 kg de flutuação. Quando se adicionou massa muito densa (desprezando o seu volume) ficou com aproximadamente 0,1 kg de flutuação. De referir que estes resultados foram obtidos no tanque de testes do laboratório (água doce) e com o veículo não completamente submerso. Quando o **AUV** estiver totalmente submerso, a impulsão será ligeiramente superior. O centro de flutuação coincide com o centro geométrico do **AUV**.

Outro resultado obtido aquando da adição de massa para estabilidade de *roll* foi a consequência de o **AUV** à tona de água, não totalmente submerso, apresentar duas posições estáveis. Quando

```

1 [mission]
2 u = 0
3 r = 0
4 pitch = 0
5 yaw = 0
6 z = 0.5
7 wait = T 20
8 z = 1.0
9 wait = T 30
10 z = 0.5
11 wait = T 30
12 z = 0.2
13 wait = T 30
14 z = 1.5
15 wait = T 30
16 z = 1.0
17 wait = T 30
18 z = 0.5
19 wait = T 30
20 z = 0
21 wait = T 20
22

```

Figura 5.2: *Script* de missão para teste do sensor de pressão

totalmente submerso passa a ter uma só posição estável, tal como pretendido. Uma análise das forças atuantes em situações que o **SHAD** está à superfície é ilustrada na Figura 5.3 e quando está completamente mergulhado, ilustrada na Figura 5.4.

5.3.2 Resultados dos testes de força aos *thrusters*

Os testes realizados aos thrusters permitiram obter os resultados, em termos de força obtida, expressos na Figura 5.5 e potência consumida na Figura 5.6.

Os gráficos das relações entre comandos, força e corrente são importantes para o controlo do veículo. Dado que é impossível medir a força aplicada pelos motores, usa-se esta relação para o modelo da força em malha-aberta. Depois dos resultados obtidos é feita uma regressão linear, resultando daí os parâmetros necessários aos controladores: ponto de interceção com zero e declive da reta:

$$\text{Movimento em frente} \begin{cases} y_0 = 17,97 \\ declive = 1,61 \end{cases}$$

$$\text{Movimento para trás} \begin{cases} y_0 = 18,03 \\ declive = 2,26 \end{cases}$$

A disposição final dos eixos escolhida é a apresentada na Figura 5.7 devido à implementação dos controladores. As relações força vs. comando são primeiramente analisadas como força em função do comando e, posteriormente, os resultados expressos nas regressões lineares vêm como comando em função da força. Esta última é a que interessa para o controlo.

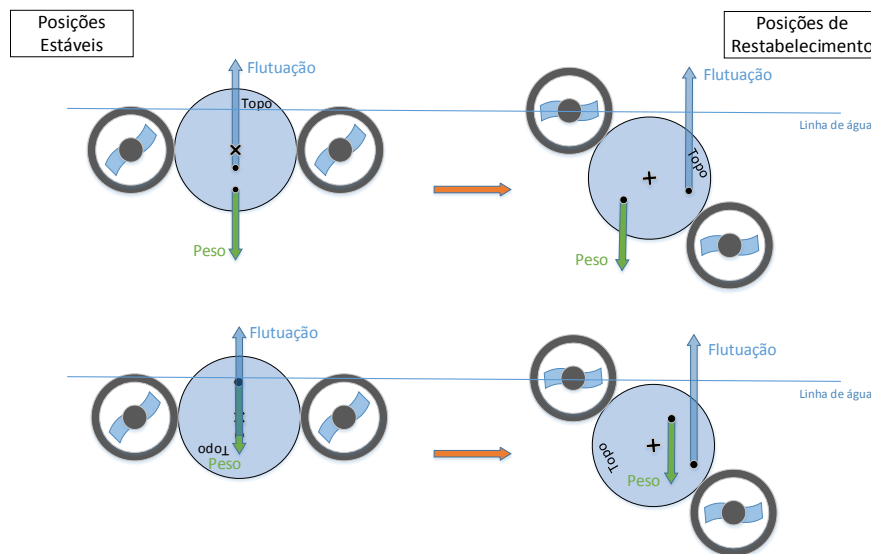


Figura 5.3: Diagrama de forças para as duas posições estáveis à superfície

5.3.3 Resultados do teste global

Os resultados seguintes são os obtidos dos testes ao sensor de pressão e [AHRS](#) juntamente com todo o sistema.

- Medidas de profundidade dadas pelo sistema: Na Figura 5.8 apresentam-se resultados da profundidade medida pelo sensor de pressão face às referências estabelecidas para o teste. Para se validarem os resultados qualitativamente, na medida do possível, foi ainda colocada uma régua graduada no tanque de testes e de forma visual comprovaram-se as descidas à profundidade de 1 m e 0,5 m que são as mais fáceis de visualizar a olho nu. No gráfico também são visíveis os erros dos controladores.
- Medidas de ângulos dados pelo sistema: nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os dados dos testes feitos à integração do [AHRS](#) no sistema. Mais uma vez, na impossibilidade de melhor *ground truth*, os resultados foram comprovados visualmente, inspecionando se os ângulos que se programaram nos ficheiros de missão estavam a ser aproximadamente descritos, face ao ângulo inicial. Em relação aos resultados obtidos pelo sistema, mais uma vez são visíveis erros que eventualmente são dos controladores ou do próprio sensor. A missão de *yaw* consistiu em dar incrementos sucessivos de 90°, de 30 em 30 segundos, num sentido até perfazer uma volta completa e por fim 180° no sentido oposto (ver Figura 5.9). A missão de *pitch* consistiu em determinar que o veículo se colocasse com ângulos, em relação à horizontal, de 20° e 30° e em seguida -20° e -30° passando por zero e ficando em cada posição 15 segundos (ver Figura 5.10).

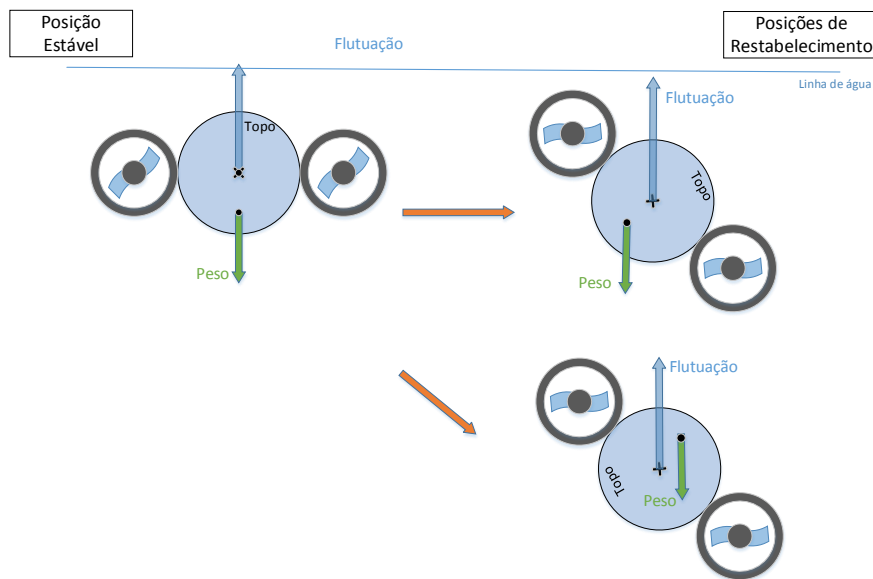
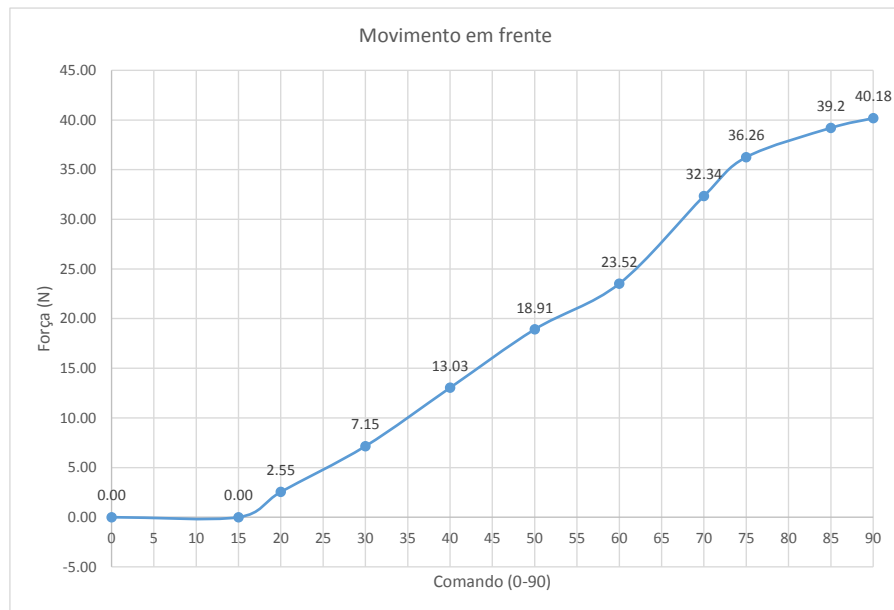
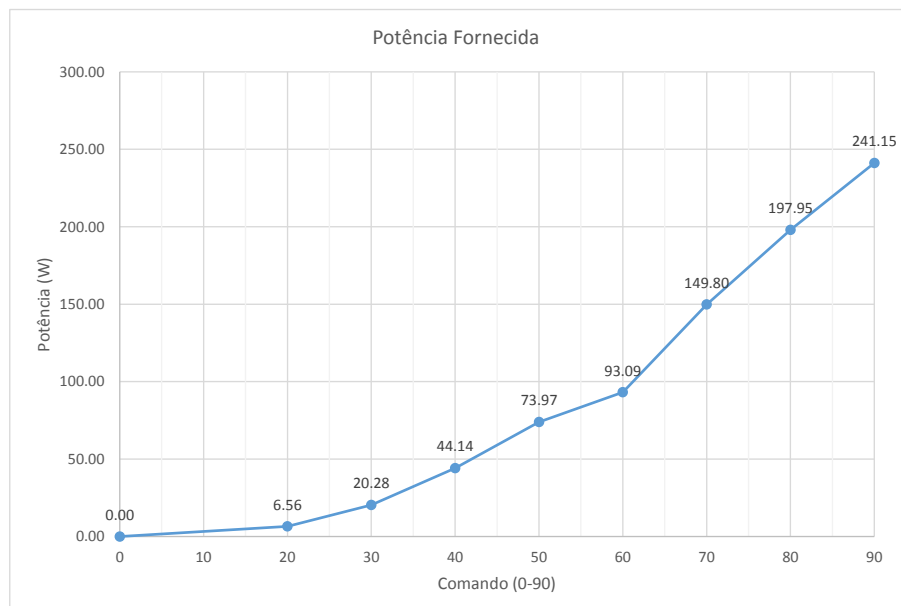


Figura 5.4: Diagrama de forças para posição estável submerso

Para também testar a dinâmica do veículo, foi planejada uma missão com referências conjuntas dos três movimentos testados separadamente. Os resultados são satisfatórios e seguem aparentemente os mesmos padrões de erro de quando testados isoladamente. A Figura 5.11 retrata esses resultados. A missão consistiu em colocar-se com os ângulos iniciais a zero; descer à profundidade de 1 m, descrever um ângulo de 20° em *pitch*, colocar *yaw* a 90° e voltar a por *pitch* a 0° . Entre cada ordem há uma espera de 15 segundos.

Figura 5.5: Força exercida por dois *thrusters*Figura 5.6: Potência consumida por dois *thrusters*

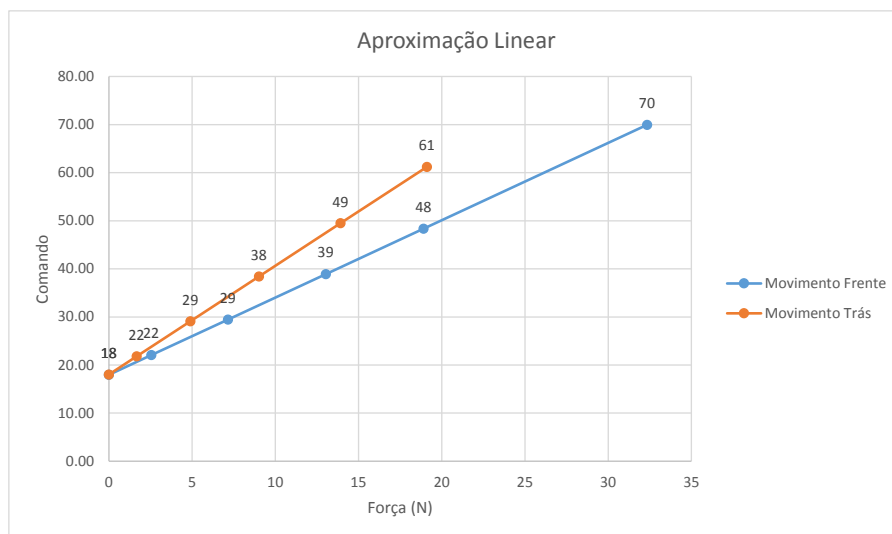


Figura 5.7: Linearização da relação força-comando

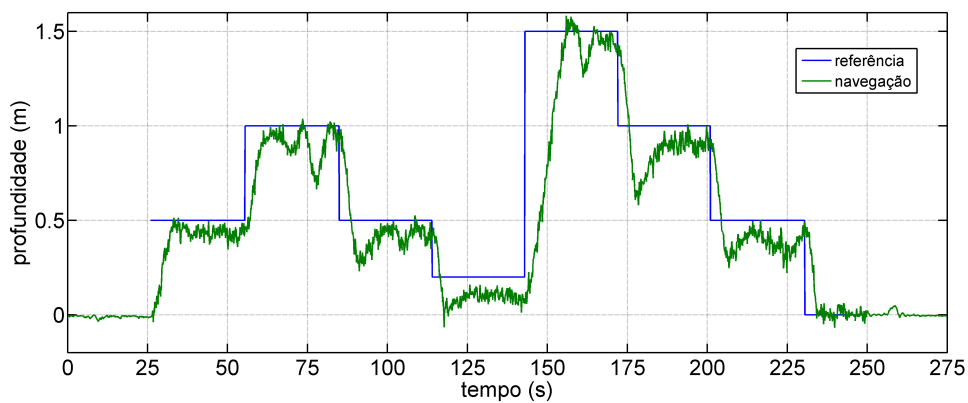


Figura 5.8: Resultados da profundidade medida no teste ao sensor de pressão

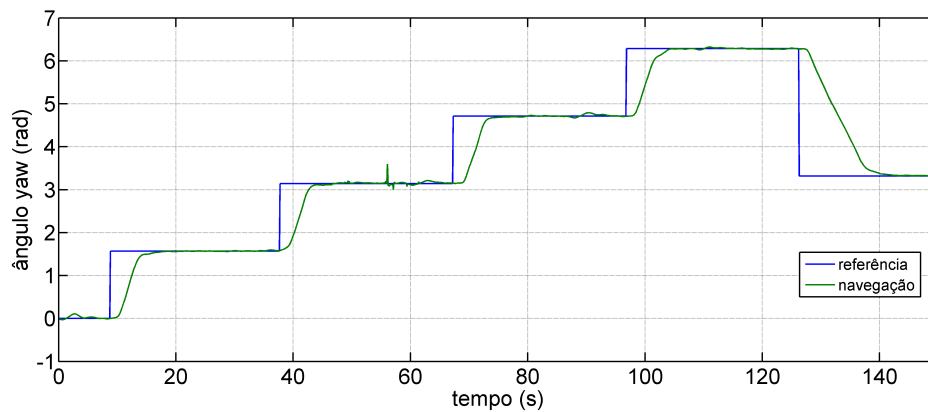
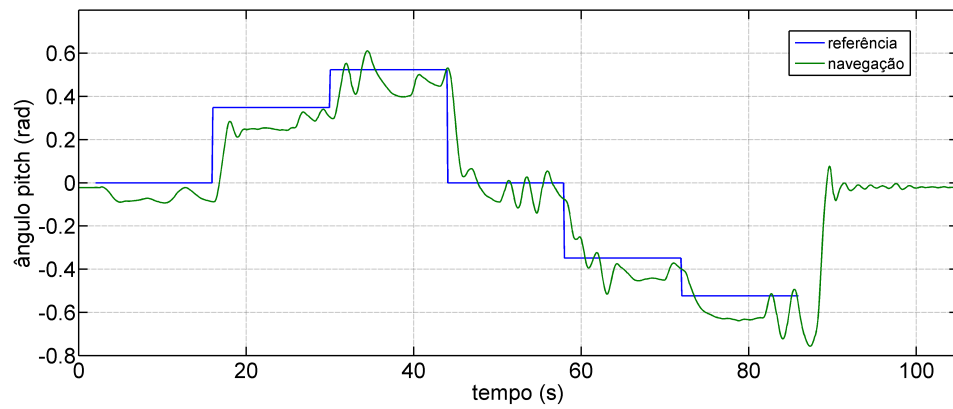
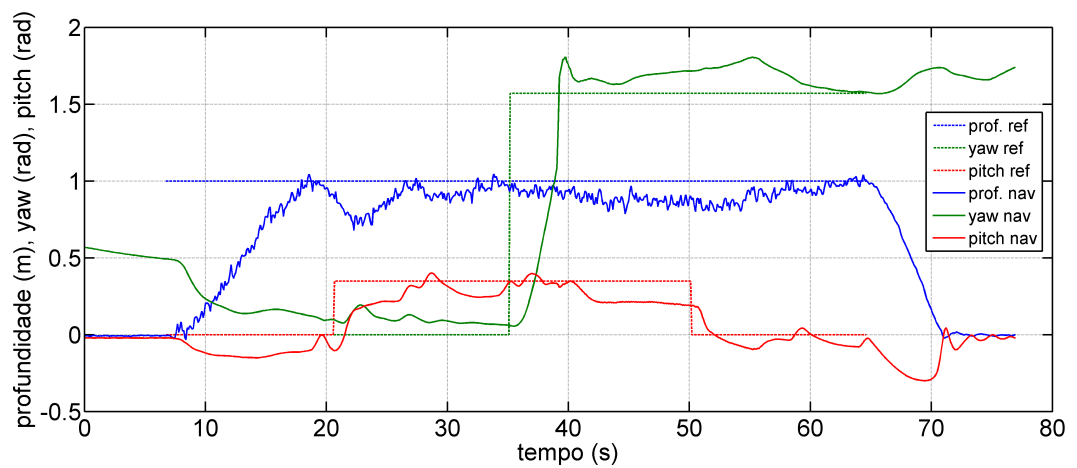


Figura 5.9: Resultados do ângulo de yaw medido no teste ao sensor inercial

Figura 5.10: Resultados do ângulo de *pitch* medido no teste ao sensor inercialFigura 5.11: Resultados de profundidade, *yaw* e *pitch* em teste composto

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

O veículo submarino autónomo, [SHAD](#), desenvolvido ao longo do trabalho, surgiu da necessidade de obter um veículo deste género com determinadas características para operar em pequenos espaços subaquáticos.

Depois de analisado o estado da arte conclui-se que seria uma mais valia científica desenvolver um veículo assim. Então, fez-se em seguida uma definição dos requisitos do sistema, o que levou também à definição de um conceito.

Com a experiência da equipa, da qual fazem parte os orientadores da dissertação, foi possível desenvolver o [SHAD](#) no laboratório, recorrendo a tecnologia já desenvolvida e ao desenvolvimento de outros subsistemas. Ferramentas eletromecânicas e computacionais foram também essenciais para o desenvolvimento do projeto.

Por fim, o resultado é um [AUV](#) com peso leve no ar, pequenas dimensões, com quatro graus de liberdade e uma grande manobrabilidade. Os testes feitos ao [SHAD](#) serviram para validar o sistema como um todo e parcialmente alguns subsistemas.

Ao nível pessoal foi adquirida experiência, conhecimento e sensibilidade nos processos de desenvolvimento de sistemas robóticos, nomeadamente submarinos. Foram também postos em prática diversos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, o que fornece outra visão mais abrangente e uma postura mais madura face à engenharia. Ao longo do trabalho houve, claro, contratempos característicos da natureza do desenvolvimento. Mas da resolução com sucesso destas questões, resultou uma prática importante na despistagem, abordagem, gestão e solução de problemas não previstos.

6.1 Satisfação dos Objetivos

Os principais objetivos foram concluídos com sucesso. São eles a elaboração de um protótipo e teste do conceito. Daqui deveria resultar, e resultou, um [AUV](#) com reduzidas dimensões, facilmente transportável e com grande manobrabilidade, próprio para operar em pequenos espaços subaquáticos. No entanto, testes mais rigorosos e desafiantes precisam ser feitos, nomeadamente para validar os subsistemas de medição por comparação com sistemas externos de medição das

mesmas grandezas e devidamente calibrados. Também são necessários testes em ambientes *out-door*. Houve, também, um objetivo que não foi concluído, ficando-se apenas pela integração de componentes no veículo, que era a implementação de um subsistema de controlo do movimento de *roll* do veículo.

6.2 Trabalho Futuro

O trabalho futuro poderá ser desenvolvido ao nível de:


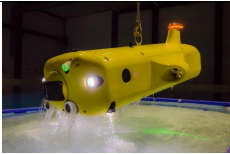



- Estrutura mecânica - restringir melhor o movimento de rotação dos módulos em relação ao cilindro central. Este por sua vez pode ser substituído por um de alumínio, por exemplo, e assim habilitar o [AUV](#) a maiores profundidades
- Conceito e desenvolvimento - estudar, desenvolver e implementar um sistema de controlo de *roll*, propriedade esta muito rara nos já existentes veículos. O veículo já tem algum *hardware* integrado nesse sentido
- *Performance* - estudar e realizar uma troca de baterias com maior autonomia e também integrar motores de gama superior para maior velocidade e manobrabilidade.

Anexo A

Exemplos de AUV

Na Tabela [A.1](#) constam as principais características de alguns [AUV](#) selecionados. A informação foi obtida online de sítios oficiais e de artigos publicados [[5](#), [4](#), [13](#), [14](#), [10](#), [8](#)].

Tabela A.1: AUV e suas características

AUV	Imagem	Ano	Dimensões (m)	Peso (no ar) (kg)	Profund. máx. (m)	Hovering	Autonomia	Aplicação	Payload	Navegação
Mares		2007	1,5x0,2dia.	32	100	Sim	Bateria Ião-Lítio 600 W h (10h / 40 km)	Monitorização, recolha de dados, mapeamento, vídeo	Espaço limitado, simples integração	Inercial, Sensor de Pressão, LBL fundido com dead reckoning e GPS
FlatFish		2015	2,2x1,1x0,5	275	300	Sim	Bateria Ião-Lítio 5,8 kWh	Inspeção de estruturas e I&D	Câmaras, Sonares, Lasers	AHRS , Sensor de Pressão, DVL , USBL e GPS
Remus 100		2003- now	1,7x0,19dia.	32	100	Não	Bateria Ião-Lítio 1,5 kWh (12h a 1,5 m/s)	Investigação, Comercial e Defesa	-	LBL , DVL fundido dead reckoning, Inercial e GPS
Sparus II		2013	1,6x0,23dia.	52	200	Sim	Bateria Ião-Lítio 1,4 kWh (8-10h)	Industrial, Científica e Académica	81 / 7 kg (no ar)	DVL , IMU , Sensor de Pressão e GPS
Nessie VI		2011	1,74x0,28dia.	-	100	Sim	Bateria Ião-Lítio 2,1 kWh	Académica e Competição	Câmaras	DVL , Sensor de Pressão, Inercial e GPS

Referências

- [1] Minghui Wang, Yongquan Yu, Bi Zeng, e Wei Lin. *Hybrid Intelligent Control for Submarine Stabilization*. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 2013.
- [2] National Oceanic e U.S. Department of Commerce Atmospheric Administration (NOAA). *What is an AUV?*, 2015. <http://oceanexplorer.noaa.gov/facts/auv.html>.
- [3] J. H. Li, M. J. Lee, S. H. Park, J. G. Kim, J. T. Kim, e J. H. Suh. *Development of P-SURO II hybrid AUV and its experimental study*. Em *OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE*, páginas 1–6, June 2013. doi:10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608045.
- [4] J. Albiez, S. Joyeux, C. Gaudig, J. Hilljegerdes, S. Kroffke, C. Schoo, S. Arnold, G. Mimoso, P. Alcantara, R. Saback, J. Britto, D. Cesar, G. Neves, T. Watanabe, P. Merz Paranhos, M. Reis, e F. Kirchnery. *FlatFish - a compact subsea-resident inspection AUV*. Em *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, páginas 1–8, Oct 2015.
- [5] N. A. Cruz e A. C. Matos. *The MARES AUV, a Modular Autonomous Robot for Environment Sampling*. Em *OCEANS 2008*, páginas 1–6, Sept 2008. doi:10.1109/OCEANS.2008.5152096.
- [6] Woods Hole Oceanographic Institution. *REMUS SharkCam: The Hunter and the Hunted*, 2014. Disponível em <https://youtu.be/faZw3IFJOXs>, acessado a última vez em 21 de Junho de 2016.
- [7] D. M. Crimmins, C. T. Patty, M. A. Beliard, J. Baker, J. C. Jalbert, R. J. Komerska, S. G. Chappell, e D. R. Blidberg. *Long-Endurance Test Results of the Solar-Powered AUV System*. Em *OCEANS 2006*, páginas 1–5, Sept 2006. doi:10.1109/OCEANS.2006.306997.
- [8] Miroslav Radojevic, Mohamad Motasem Nawaf, Francesco Maurelli, Tummas Tomasson, Chengjia Wang, Jonathan Clay, e Yvan Petillot. *Nessie VI autonomous underwater vehicle*, 2011.
- [9] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, chapter 2, páginas 5–6. John Wiley & Sons, University of Trondheim, Norway, 1994.
- [10] Marc Carreras. *Design of SPARUS II AUV*. Relatório técnico, Underwater Robotics Research Centre (CIRS), Computer Vision and Robotics Institute, Universitat de Girona, January 2014.
- [11] D. Ribas, N. Palomeras, P. Ridao, M. Carreras, e A. Mallios. *Girona 500 auv: From survey to intervention*. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 17(1):46–53, Feb 2012. doi:10.1109/TMECH.2011.2174065.
- [12] Gary A. Crowell Sr. *The descriptive geometry of nose cones*, 1996. Disponível em https://web.archive.org/web/20110411143013/http://www.ifsc.usp.br/~projetosulfos/artigos/NoseCone_EQN2.PDF, acessado a última vez em 10 de Junho de 2016.

- [13] Kongsberg Maritime. *Autonomous underwater vehicle - REMUS 100*, Junho 2016. <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/D241A2C835DF40B0C12574AB003EA6AB>.
- [14] Underwater Robotics Research Centre (CIRS). *SPARUS II AUV*, 2014. <http://cirs.udg.edu/auvs-technology/auvs/sparus-ii-auv/>.